



**Universidad
Andrés Bello®**

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la Tierra

**INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE CUERPOS COHESIVOS EN LA EVOLUCIÓN
ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA COMPRESIVO: APROXIMACIONES DESDE LA
MODELACIÓN ANALÓGICA.**

Memoria de pregrado para optar al título de Geólogo.

Matías Andrés Villarroel Lastra.

Profesor guía:

Pamela Jara Muñoz.

Miembros de la comisión:

Reynaldo Charrier,

Jean Baptiste Gressier.

Santiago de Chile, 2017.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Hipótesis de trabajo.....	4
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General:.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos:.....	4
1.4. Metodología General.....	5
2.MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Conceptos estructurales básicos.....	8
2.2. Modelo de cuña crítica.....	10
2.3. Modelación analógica.....	13
2.3.1. Antecedentes sobre materiales cohesivos.....	15
2.4. Propuesta.....	17
3.METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	18
3.1. Limitaciones del modelado análogo.....	18
3.2. Teoría del escalamiento (basado en Twiss y Moores, 2007).....	19
3.3. Presentación de experiencias.....	23
3.3.1. Propiedades de los materiales.....	23
3.3.2. Aparato experimental y montaje.....	26
3.4. Metodología para el análisis de la deformación.....	30
4.RESULTADOS	32
4.1. Modelo CIL_BAJ_01.....	33
4.1.1. Evolución superficial (vista en planta).....	33
4.1.2. Estado final (vista de perfil).....	36
4.2. Modelo CIL_ALT_02.....	38
4.2.1. Evolución superficial (vista en planta).....	38
4.2.2. Estado final (vista de perfil).....	40
4.3. Modelo TAB_PAR_BAJ.....	43

4.3.1. Evolución superficial (vista en planta).....	43
4.3.2. Estado final (vista de perfil).....	45
4.4. Modelo TAB_PAR_ALT.....	48
4.4.1. Evolución superficial (vista en planta).....	48
4.4.2. Estado final (vista de perfil).....	50
4.5. Modelo TAB_OBL_BAJ.....	53
4.5.1. Evolución superficial (vista en planta).....	53
4.5.2. Estado final (vista de perfil).....	55
4.6. Modelo TAB_OBL_ALT.....	58
4.6.1. Evolución superficial (vista en planta).....	58
4.6.2. Estado final (vista de perfil).....	61
5.ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS.....	65
5.1. Características generales.....	66
5.2. Rol de los factores.....	68
5.2.1. Cohesión del cuerpo.....	68
5.2.2. Geometría del cuerpo.....	71
5.2.3. Disposición del cuerpo.....	73
6.DISCUSIÓN.....	77
6.1. Rasgos generales.....	77
6.2. Rol de los factores: cohesión, geometría y disposición del cuerpo cohesivo.....	80
6.3. Comparación con ejemplos naturales.....	83
7.CONCLUSIONES.....	88
8.REFERENCIAS.....	90
ANEXO 1: FUNCIONAMIENTO SERVO MOTOR Y SERVO DRIVER.....	100
ANEXO 2: REGISTRO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	103
ANEXO 3: ENSAYOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Bosquejo original del montaje experimental diseñado por Hall (1815) para la modelación de pliegues, modificado de Graveleau (2012).....	1
Fig. 2: Aparato experimental de McClay (2004) que muestra la utilización de un bloque rígido para producir la deformación compresiva de una sucesión formada en un contexto extensional, modificado de McClay (2004).....	3
Fig. 3: Clasificación de la dinámica de fallas según Anderson (1905). Modificada de McClay (1987).....	9
Fig. 4: Analogía de la cuña crítica representada por material siendo empujado por un bulldozer, modificado de Dahlen (1990).....	11
Fig. 5: Influencia del ángulo de despegue basal (β) en la geometría de la cuña, modificado de Koyi y Vendeville (2003).....	12
Fig. 6: Mesa de modelación y sus componentes principales.....	27
Fig. 7: A), B) y C) Vista en planta del montaje experimental según geometría y disposición del cuerpo cohesivo: cilindro, tabular paralelo y tabular oblicuo, respectivamente. D).....	28
Perfil esquemático del montaje experimental, corresponde a la traza ubicada en el centro del modelo y ortogonal al muro móvil, indicada en cada vista en planta con la línea gris punteada.....	28
Fig. 8: Preparación del arreglo inicial. A) Vista en planta del paquete granular hasta la penúltima capa. B) Molde inserto posterior a la succión del material en su interior. C) Segundo molde inserto, el cual contiene al cuerpo cohesivo. D) Cuerpo inserto en el interior del paquete granular, posterior a la extracción de ambos moldes. E) Arreglo inicial original, con capa superficial cubriendo al cuerpo cohesivo y grilla 5 x 5 cm sobre esta.....	29
Fig. 9: Distribución de secciones para el análisis de la deformación interna en el estado final del sistema.....	31
Fig. 10: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo CIL_BAJ_01 según cantidad de acortamiento	

(ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación.

F) Estado final de la experiencia.....35

Fig. 11: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo CIL_BAJ_01. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 10. H)

Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.....37

Fig. 12: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo CIL_ALT_02 según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación.

F) Estado final de la experiencia.....40

Fig. 13: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo CIL_ALT_02. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 12. H)

Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.....43

Fig. 14: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_PAR_BAJ según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de

generación. F) Estado final de la experiencia.....45

Fig. 15: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_PAR_BAJ. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 14. H)

Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.....47

Fig. 16: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_PAR_ALT según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del

cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.....	50
Fig. 17: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_PAR_ALT. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 16. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.....	52
Fig. 18: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_OBL_BAJ según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.....	55
Fig. 19: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_OBL_BAJ. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 18. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.....	58
Fig. 20: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_OBL_ALT según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.....	61
Fig. 21: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_OBL_ALT. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 20. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.....	64
Los perfiles tienen orientación E-W.	64
Fig. 22: Diferencia de acortamiento entre el desarrollo de F2 y F3 para cada modelo.....	67
Fig. 23: Cantidad de fallas inversas que cortan el cuerpo cohesivo en cada una	

de las experiencias. Se observa la tendencia a disminuir esta cantidad en los modelos de cohesión alta, respecto a los de baja.....	69
Fig. 24: Alturas máximas de las cuñas de acreción formadas en las experiencias, agrupadas en relación a los pares de experiencias que tienen a la cohesión como variable en cuestión. Se observa la relación inversa que acompaña al aumento de cohesión respecto al crecimiento y decrecimiento de la 1ra cuña y 2da cuña, respectivamente.....	70
Fig. 25: Distancia de alcance de la deformación desde el muro móvil hacia el oriente para los cuatro modelos comparados según geometría.	73
Fig. 26: Cantidad de retrocorrimientos generados en las experiencias, comparación según disposición del cuerpo cohesivo. Se observa que solo se generan ese tipo de estructuras en las experiencias con disposición oblicua del cuerpo respecto al muro móvil.....	74
Fig.27: Numero de fallas inversas que cortan el cuerpo cohesivo en profundidad para cada modelo, según comparación respecto a disposición del cuerpo. Se observa la gran cantidad de fallas seccionando el material cohesivo en los modelos de disposición oblicua en comparación con los paralelos.....	76
Fig. 28: Esquema conceptual de la evolución interna de una cuña de acreción. A) Paquete granular horizontal, previo al inicio de la deformación. B) Estado intermedio de la deformación, a medida que se alza la cuña y llega a su ángulo crítico, esta se deforma internamente generando una imbricación de fallas en secuencia. C) Estado avanzado de la deformación, se observa la rotación de las imbricaciones antiguas hacia la zona de empuje. α corresponde al ángulo de pendiente del frente de la cuña y β es el manteo de las fallas inversas. β rota hacia atrás empinándose, a medida que progresa la deformación.....	78
Fig. 29: A) Modelo TAB_PAR_ALT ejecutado en este estudio. B) y C) Comparación entre os modelos de Marques y Cobbold (2002) y el Altiplano de los Andes Centrales (Modificado de Marques y Cobbold, 2002). Se observan similitudes entre cada configuración estructural, la presencia de cadenas montañosas arqueadas tanto antes y delante del objeto en cuestión y la existencia de zonas de transferencias en los límites extremos.....	84

Fig. 30: Diagrama esquemático de aspectos observados en casos naturales. A) Vista en planta donde se muestra que las estructuras evitan al cuerpo cohesivo, y la gran mayoría de estas aparecen al S del cuerpo. B) Vista en planta del caso en que las estructuras adoptan la geometría del borde del cuerpo cohesivo como su rumbo.....	86
Fig. A1: Selección del “Parameter Initial Wizard” (izquierda), definición de parámetros de velocidad en entradas digitales DI3 y DI4 (derecha).....	101
Fig. A2: Selección de modo de control y opción “Internal Speed/Torque”	102
Fig. A3: Ventana de operación “Digital IO/Jog Control” con parámetros “Servo On” y “Speed command selection 1~4 Bit0” seleccionados y listos para ser activados para controlar el movimiento del eje del servo motor según requerimientos.....	102
Fig. A4: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M3 (detalles y observaciones en ANEXO 3).....	103
Fig. A5: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M4 (detalles y observaciones en ANEXO 3).....	104
Fig. A6: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M5 (detalles y observaciones en ANEXO 3).....	105
Fig. A7: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M7 (detalles y observaciones en ANEXO 3).....	106
Fig. A8: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M8 (detalles y observaciones en ANEXO 3).....	107
Fig. A9: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M9 (detalles y observaciones en ANEXO 3).....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factores de escala para variables involucradas en el sistema, extraído de Twiss y Moores, 2007.....	20
Tabla 2: Propiedades de los materiales utilizados y proporción de gelatina en mezclas.....	24
Tabla 3: Codificación de la totalidad de las experiencias con las características del cuerpo inserto en cada modelo.....	32
Tabla 4: Tabla resumen de los resultados de los modelos presentados en el capítulo 4. La división “paralelo” u “oblicuo”, en la geometría de prisma tabular del cuerpo, corresponde a su disposición en relación al muro móvil. El campo “rumbo” corresponde a una aproximación de lo que se manifiesta en los modelos. “Alcance E-W” corresponde a la distancia, en centímetros, medida desde el muro móvil hasta la evidencia de deformación más oriental del estado final de las experiencias.....	65
Tabla A1: Especificaciones técnicas de la combinación servo driver y servo motor de baja inercia.....	100
Tabla A2: Tabla con las características y observaciones de los ensayos y pruebas de laboratorio que dieron paso a la elaboración del montaje experimental definitivo.....	109

RESUMEN

Diversos son los factores que influyen en la evolución estructural de un sistema de deformación compresiva. La comprensión de estos parámetros es fundamental para el análisis estructural de una región determinada. En este trabajo se estudia el control que ejerce la presencia de cuerpos más cohesivos que el entorno, con el objetivo de entender la importancia de este factor en la configuración estructural de un sistema compresivo. La metodología seleccionada es la modelación analógica dado que permite simplificar el sistema, y conocer la influencia de factores aislados. La representación generalizada que se le ha dado a rocas más competentes que el entorno, ha sido a través de la ubicación de bloques de madera u otro material rígido, lo cual limita la generación de estructuras según la geometría predeterminada del material indeformable. Con la finalidad de modelar el contraste de competencia entre un cuerpo cohesivo y su entorno, se generan seis experimentos que incluyen variaciones en la cohesión de dicho cuerpo, como también en su geometría y disposición. Los resultados muestran la tendencia general de las fallas de evitar al cuerpo, induciendo la migración de la deformación hacia el sector distal del sistema. El alzamiento de dos cuñas de acreción, una próxima al empuje y otra desplazada hacia el borde opuesto del cuerpo, es otra tendencia en las experiencias. Las alturas de estas cuñas guardan una relación inversa que depende de la cohesión, a mayor cohesión la diferencia de altura entre ellas disminuye, y a menor cohesión esta diferencia aumenta. Además, las trazas superficiales de las estructuras son propensas a adoptar la geometría de los bordes externos del cuerpo, como también, las disposiciones oblicuas favorecen tanto la generación de retrocorrimientos, como el fallamiento de los cuerpos en profundidad. Se comparan los resultados con casos naturales a diferentes escalas, donde se pueden observar patrones similares a los de los modelos. Se sugiere considerar la presencia de cuerpos más resistentes que su entorno (intrusivos o basamentos cristalinos, entre otros) para explicar curvaturas en patrones estructurales naturales (como fajas plegadas y corridas u orógenos).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Los procesos de origen tectónico ocurren en una amplia escala de espacio y tiempo, lo cual dificulta el correcto análisis e interpretación de estos fenómenos. De manera experimental se ha recurrido a representaciones simplificadas de laboratorio a través de modelos análogos u otros métodos de modelamiento como los son el analítico y el numérico, para dar explicación a fenómenos geológicos y procesos geodinámicos en el sistema Tierra. Para que la reproducción experimental adquiera coherencia con respecto al fenómeno natural se debe respetar el escalamiento proporcional de ciertos parámetros como: geometría, material, tiempo, velocidad de deformación, esfuerzos, entre otros (Hubbert, 1937). Conforme a esto, el modelamiento analógico permite estudiar, tanto la evolución de procesos geodinámicos, como la influencia de un parámetro físico en particular, dentro de un contexto controlado de laboratorio a escalas de tiempo de segundos a horas y escalas de longitud de milímetros a metros (Schellart, 2016).

La historia del modelamiento analógico cuenta con una larga trayectoria de más de 200 años de aplicación. El primer registro de utilización de esta metodología con el fin de modelar procesos geológicos fueron los experimentos conducidos por James Hall (Hall, 1805 y 1815), cuyos resultados le permitieron concluir que los pliegues generados en la naturaleza son producto de esfuerzos compresivos horizontales, similar a lo observado en sus modelos (Fig. 1).

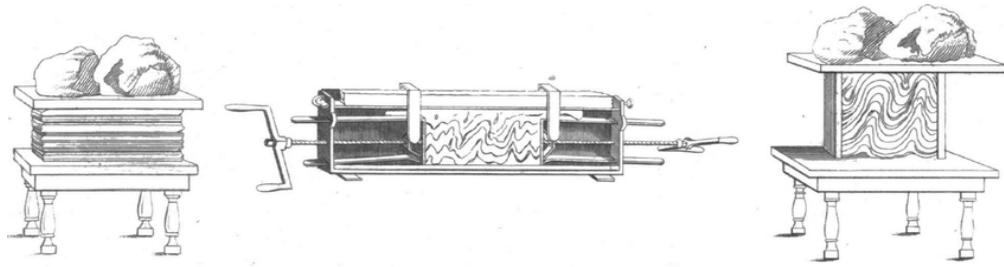


Fig.1: Bosquejo original del montaje experimental diseñado por Hall (1815) para la modelación de pliegues, modificado de Gravelleau (2012).

Durante el siglo XIX varios autores inspirados por los experimentos de Hall incursionaron en el modelamiento analógico para explicar rasgos estructurales como fallas, pliegues y fracturas presentes en las cadenas montañosas (e.g. Favre, 1878; Daubrée, 1879; Schardt, 1884; Cadell, 1889; Willis, 1893). En el siglo XX, aumenta considerablemente la cantidad de procesos geológicos representados a través del modelamiento analógico abarcando una gran variedad de fenómenos naturales desde la formación de domos salinos (e.g. Escher y Kuenen, 1929; Link, 1930; Parker y McDowell, 1955), pasando por la generación de plumas mantélicas (e.g. Whitehead y Luther, 1975), hasta procesos asociados al ciclo de Wilson como: subducción (e.g. Jacoby, 1973; Jacoby, 1976; Kincaid y Olson, 1987), “rifting” litosférico (e.g. Shemenda and Grocholsky, 1994; Brune y Ellis, 1997), colisión de continentes (e.g. Tapponnier *et al.*, 1982; Davy and Cobbold, 1988; Ratschbacher *et al.*, 1991), acortamiento litosférico (e.g. Davy y Cobbold, 1991), entre otros.

Un importante acontecimiento en la metodología del modelamiento análogo corresponde al establecimiento de la teoría del escalamiento introducida por Hubbert (1937), con lo cual deja de ser una herramienta meramente descriptiva y pasa a ser una técnica cuantitativa. Según esta teoría, el modelamiento análogo puede ser representativo de un fenómeno geológico solo si cumple tres similitudes esenciales, correspondientes a las geométricas, cinemáticas y dinámicas (Hubbert, 1937). Esto permite escalar resultados cuantitativos de los modelos como velocidades, esfuerzos, deformación porcentual y variaciones geométricas, comparables a valores en la naturaleza,

otorgando un entendimiento profundo respecto a los fenómenos en estudio (Schellart, 2016).

Desde entonces, notables avances han contribuido a la realización de modelos cada vez más optimizados a medida que las tecnologías permiten controlar variables y extraer información de manera detallada. Uno de estos casos corresponde a la combinación de materiales frágiles y viscosos simulando la corteza y el manto litosférico (Faugere y Brun, 1984; Davy y Cobbold, 1988 y 1991).

Hasta la actualidad, el tratamiento que se le ha dado al basamento o a cuerpos intrusivos (*ie.* rocas cristalinas más competentes que el entorno) en los modelos, es generalmente de carácter rígido mediante la ubicación de bloques indeformables de madera o láminas de aluminio (McClay, 1992; Yamada y McClay, 2003 y 2004; Mitra, 1993; Buchanan, 1991, entre otros), lo cual limita la generación y reactivación de estructuras de acuerdo a una geometría predeterminada según la disposición y forma del material indeformable (Fig. 2). A raíz de la falta de estudios de modelamiento analógico que consideren un contraste de competencia entre cuerpos discordantes y el medio, surge la necesidad de comprender el comportamiento estructural de una zona de estas características ante un evento de deformación.

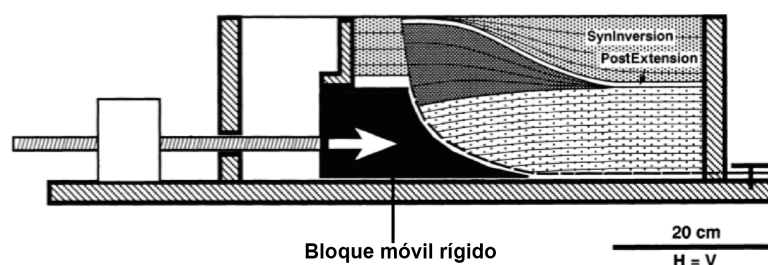


Fig. 2: Aparato experimental de McClay (2004) que muestra la utilización de un bloque rígido para producir la deformación compresiva de una sucesión formada en un contexto extensional, modificado de McClay (2004).

En este trabajo se propone una alternativa a la modelación de cuerpos de mayor cohesión que el entorno (*eg.* cuerpos intrusivos, basamentos

cristalinos, entre otros), y que, en consecuencia opongan mayor resistencia a la deformación que dicho medio. Para modelar este material competente, se confecciona un cuerpo que presente mayor cohesión que el material del entorno, pero tal que no sea indeformable, con el fin de comprender cómo influye la presencia de estos cuerpos, en la configuración estructural de una región afectada por un evento de deformación compresiva.

1.2. Hipótesis de trabajo

Este trabajo se basa en la hipótesis de que el contraste de competencias entre cuerpos discordantes de mayor cohesión (eg. cuerpos intrusivos o basamentos cristalinos) y su entorno (eg. secuencia sedimentaria), corresponde a un factor influyente en la evolución estructural de una región (momento, ubicación y disposición de estructuras) ante procesos de deformación compresiva.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General:

Comprender cómo influye la variación en el contraste de competencia entre el entorno y un cuerpo más cohesivo, en la configuración estructural de una región que se vea afectada por un evento de deformación, utilizando modelos análogos.

1.3.2. Objetivos Específicos:

Generar un modelo análogo representativo de un sistema natural compresivo, que incorpore un contraste de competencias entre un cuerpo cohesivo y su entorno. Respecto a esto se pretende:

Reconocer la influencia del contraste de materiales en la respuesta estructural ante la deformación aplicada.

Entender el rol que ejerce la presencia de cuerpos de distinta cohesión en la evolución estructural de sistemas compresivos.

Comprender el control estructural que ejercen los cuerpos cohesivos según su geometría y disposición.

Reconocer similitudes y diferencias entre los resultados de la modelación y prototipos naturales descritos en la literatura.

1.4. Metodología General

A continuación se describe, de manera generalizada, la metodología adoptada para la elaboración de este estudio; los detalles acerca de las herramientas utilizadas serán expuestos en capítulos posteriores:

Recopilación bibliográfica: Con el objetivo de generar un modelo representativo de un sistema compresivo que considere contrastes de competencia entre un cuerpo y su entorno, se recurrió a la recopilación y análisis de la literatura referente al modelamiento físico, teoría del escalamiento, propiedades mecánicas de los materiales análogos, como también a estudios y mapas de prototipos naturales que cumplen con las características en cuestión.

Trabajo de laboratorio: Se realizaron series de modelos análogos en las dependencias del Laboratorio de Modelación Analógica Usach, sobre una mesa de modelación construida y diseñada por estudiantes memoristas de Ingeniería Civil Mecánica (Conejeros y Bustos, 2016), en el contexto de un proyecto DICYT (Vicerrectoría de Investigación Desarrollo e Innovación, Usach), a cargo de la profesora guía de este trabajo de título. Esta corresponde a una mesa

absolutamente versátil para las tareas del modelado. Su sistema de movimiento funciona a través de un servo driver que controla un servo motor acoplado a un tornillo sin fin y que en su parte posterior impulsa al muro móvil que deforma el material dispuesto en su lado opuesto (Anexo 1). Esta mesa también cuenta con seis líneas de nueve perforaciones de 1/2" para la ubicación de pivotes u obstáculos en disposición a convenir.

El trabajo en laboratorio se realizó en varias etapas, las cuales se describen a continuación.

Ensayos de geometría: Se realizan diversas pruebas de modelos análogos de acuerdo a diferentes dimensiones tanto de la secuencia estratificada como del cuerpo inserto en su interior. De este último, también se ensaya su geometría y disposición en el arreglo, con el fin de identificar las características del modelado necesarias para la correcta interpretación de los resultados

Ensayos de materiales: Estos consistieron en el aumento de la cohesión del material análogo (eg. arena) a través de la incorporación de gelatina en distintas proporciones (según bibliografía) a modo de definir un rango de proporciones que sea apropiado para la representatividad y el análisis de los resultados del modelo.

Construcción de piezas: Se generaron piezas y herramientas en torno a la ejecución del modelamiento, bajo los parámetros requeridos en las experiencias. Para la disposición de cuerpos discordantes dentro de la secuencia estratificada, se diseñaron moldes de aluminio según a la geometría y dimensiones de los diferentes cuerpos cohesivos. Además se desarrolla un protocolo para la inserción de cuerpos dentro de la secuencia de área estratificada.

Elaboración de modelos finales: Con este objetivo se diseñaron series de modelos que varían según: a) dos proporciones de arena/gelatina (baja y alta) y b) tres geometrías de cuerpos cohesivos (cilíndrico, tabular perpendicular a la dirección de acortamiento y tabular a 45° de la dirección de acortamiento).

En total, se ejecutaron seis configuraciones análogas en las cuales, los demás parámetros (dimensiones del modelo, velocidad, dirección y longitud de acortamiento, entre otros) permanecen fijos, con la finalidad de analizar y comparar los resultados expuestos en cada uno de los modelos.

Análisis de datos: Para registrar la evolución en planta de las experiencias se hizo uso de una cámara digital dispuesta en el techo y controlada de manera remota a través de un móvil. Una vez finalizadas las experiencias, se procede a cohesionar el modelo humedeciéndolo para ser seccionado y registrado en su vista de perfil, perpendicularmente a la dirección de deformación. Finalmente, el registro de los resultados obtenidos se integra a la información recopilada para ser analizada y procesada a través de la confección de gráficos, imágenes y tablas, como también para ser sujeta a la comparación con prototipos naturales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos estructurales básicos

Los esfuerzos tectónicos producto del movimiento e interacción de las placas litosféricas, tienen la capacidad de deformar la corteza terrestre provocando nuevas estructuras. Las estructuras más comunes en la Corteza Superior corresponden a las fracturas, que según Niemeyer (2008) son planos de discontinuidad en la roca condicionados por la pérdida de cohesión del material. En el caso de que exista un desplazamiento a lo largo del plano de fractura debido a la aplicación de un esfuerzo de cizalle, dicha fractura es denominada como *falla* (Niemeyer, 2008).

Anderson (1905) clasificó la dinámica de las fallas según la ubicación de los tres principales vectores de esfuerzo, correspondientes a: σ_1 , σ_2 y σ_3 , ortogonales entre ellos y que mantienen como requisito; $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. La posición de estos vectores determina tres tipos de fallas: (1) normal, con σ_1 (vertical) y $\sigma_2 - \sigma_3$ (horizontales) (2) transcurrente, con $\sigma_1 - \sigma_3$ (horizontales) y σ_2 (vertical) y (3) inversa, con $\sigma_1 - \sigma_2$ (horizontales) y σ_3 (vertical) (Fig. 3). Esta clasificación es muy limitada para efectos interpretativos, pues no explica una gran cantidad de escenarios, tales como las fallas lítricas o fallas transcurrentes con cambios de rumbo, entre otros.

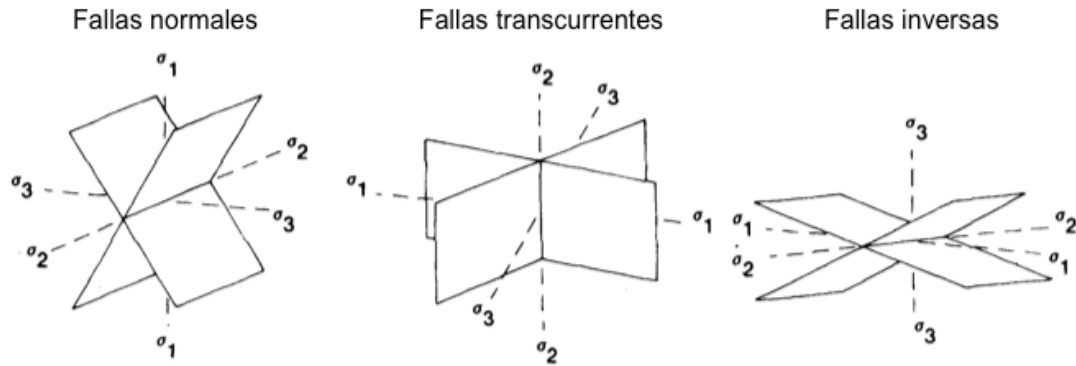


Fig. 3: Clasificación de la dinámica de fallas según Anderson (1905). Modificada de McClay (1987).

Según Niemeyer (2008), la clasificación de las fallas que resulta más útil corresponde a la que toma en cuenta el movimiento relativo de dos puntos originalmente adyacentes, a lo largo del plano de falla o también conocido como el *rechazo*. De acuerdo a esto y a grandes rasgos, se denomina falla normal a la fractura que registra un desplazamiento del bloque colgante hacia abajo en relación al bloque yacente, generalmente poseen manteos elevados promediando los 60° y se asocian a regímenes extensionales e implican un alargamiento cortical. Así mismo, se denomina falla transcurrente a aquella fractura que evidencia desplazamientos horizontales entre los bloques contiguos, que según la dirección de movimiento puede ser sinistral o dextral, si es que al pararse en un bloque, el bloque ubicado al otro lado de la falla, se mueve hacia la izquierda o derecha, respectivamente. Finalmente, se denomina falla inversa a aquella fractura caracterizada por un alzamiento del bloque colgante respecto al bloque yacente. Esta última es generada como resultado de esfuerzos contraccionales en sistemas compresivos, provocando el acortamiento de la secuencia de rocas.

La combinación de los movimientos existentes en los tres principales tipos de falla da por resultados un comportamiento oblicuo, que es la conjunción entre movimientos transcurrentes con componentes normales o inversos.

Las experiencias realizadas en este estudio son modelos análogos en régimen de convergencia, aplicados con el fin de investigar el comportamiento

mecánico de los cuerpos cohesivos y su entorno. Las diferencias entre cada experimento son definidas de acuerdo a la cinemática de las fallas, tomando en cuenta, entre otros aspectos, su evolución (momento de generación), ubicación respecto del cuerpo cohesivo, orientación y continuidad. Otra consideración para comparar y analizar en los modelos corresponde a la elevación superficial de la cuña de convergencia.

A continuación se abarcan de manera teórica, aquellos conceptos relacionados con la evolución estructural de un sistema compresivo simple, en que el mecanismo de deformación se puede asimilar al modelo de cuña crítica propuesto por Davis *et al.* (1983).

2.2. Modelo de cuña crítica

La teoría del modelo de cuña crítica postula que la evolución estructural de una cuña orogénica es equivalente a una cuña de arena formada por el impulso de un *bulldozer* en movimiento (Fig. 4) (Chapple, 1978; Dahlen, 1990; Davis *et al.*, 1983; Elliott, 1976; Suppe, 1981; Graveleau *et al.*, 2012). Esta ley surge para dar explicación a la deformación de las fajas plegadas y corridas, las cuales evolucionan según condición de estabilidad o crítica respecto al ángulo de la pendiente de superficie de la cuña (α) y al de la superficie de despegue basal (β). La suma de los dos ángulos ($\alpha + \beta$) corresponde a la cuña crítica. El estado de cuña crítica depende de la fricción y presión de fluidos intersticiales tanto internamente como a lo largo de la superficie de despegue basal (Davis *et al.*, 1983).

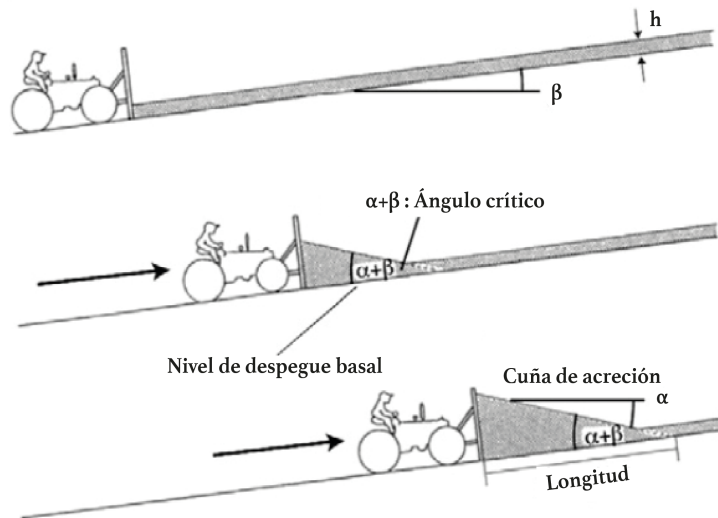


Fig. 4: Analogía de la cuña crítica representada por material siendo empujado por un *bulldozer*, modificado de Dahlen (1990).

En el estado estable o crítico las fuerzas gravitatoria y compresiva permanecen balanceadas con la fuerza de fricción generada en la superficie del despegue basal, a lo largo del cual se desplazaría la cuña. Cualquier perturbación en los parámetros geométricos o mecánicos significará un reajuste del material mediante el desarrollo de procesos que impliquen volver a su fase de estabilidad. En una secuencia normal, la deformación se produce desde el frente de deformación hacia el pie de la cuña, ubicando las estructuras más jóvenes en este último. Si el ángulo de la cuña se incrementa, esta pasará a un estado “supercrítico” y tenderá a disminuir dicho ángulo a través de la formación de nuevas fallas, erosión en la región más elevada o incluso un colapso u otros procesos relacionados. Por el contrario, si el ángulo de la cuña se deprime, pasa a un estado “subcrítico” y por consecuencia, la tendencia lo lleva a elevarse por medio de la deformación interna con corrimientos fuera de secuencia, plegamiento de estructura anteriores o la formación de un *duplex* entre otros (eg. DeCelles y Mitra, 1995; Mitra, 1997).

Existe una gran variedad de parámetros que afectan la evolución estructural de la cuña (*thrust wedge*). Dos de los principales parámetros corresponden a las propiedades, por un lado del despegue basal y por otro a

las del material deformado (Graveleau *et al.*, 2012). En el primer caso, un factor a tener en cuenta es la inclinación del despegue basal, la cual se encuentra estrechamente relacionada con la fricción a lo largo de la superficie de despegue. Para modelos con fricción basal fija e inclinación de despegue apuntando al grueso de la cuña se obtienen geometrías gruesas y empinadas en comparación al caso sin inclinación, contraste que es mayor para el caso de inclinaciones que apuntan hacia el pie de la cuña (Koyi y Vendeville, 2003) (Fig. 5). Esta influencia tiende a disminuir cuando la fricción basal es menor.

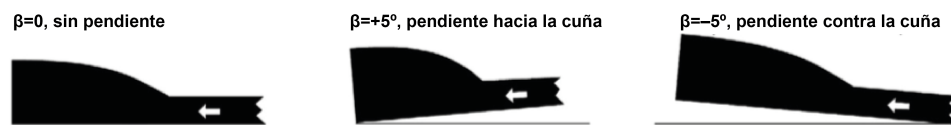


Fig. 5: Influencia del ángulo de despegue basal (β) en la geometría de la cuña, modificado de Koyi y Vendeville (2003).

El rol que juegan las propiedades de los materiales que constituyen la cuña en su evolución estructural depende de ciertos parámetros de control como la cohesión (Gomes, 2006), fricción (Lohrmann *et al.*, 2003), espesor (Teixell y Koyi, 2003), porosidad y permeabilidad (Cobbold *et al.*, 2001), entre otros. Estos factores controlan la respuesta mecánica y la resistencia de la cuña ante la deformación. Con el fin de estudiar el comportamiento mecánico de la alternancia de capas de diferentes propiedades, diversos autores han experimentado la influencia del contraste mecánico vertical en la secuencia sedimentaria (Graveleau *et al.*, 2012).

A finales del siglo XIX, Daubre (1878, 1879) daba cuenta de la importancia de las propiedades mecánicas del material constituyente de las capas de la cuña, demostrando su relación directa con la longitud de onda en el desarrollo de pliegues en modelos con intercalación de zinc, hierro y plomo laminado. Más tarde, Forchheimer (1883) utiliza arcilla humedecida y mezclas de arena intercaladas para estudiar transmisiones de presión en diferentes regímenes de deformación (*eg.* extensión, y compresión horizontal y vertical). Schardt (1884) a través de la aplicación de modelos con capas alternadas de

arena y arcilla mezclada y humedecida concluye que las capas competentes controlan la longitud de onda de la deformación, en cambio las menos competentes responden pasivamente ante los esfuerzos. Continuando el trabajo de los pioneros, son variados los autores que han dedicado sus esfuerzos en entender la mecánica del material acresionado (eg. Dixon y Summers, 1985; Dixon y Tirrul, 1991; Galland *et al.*, 2006; Gestain *et al.*, 2004; Hoth *et al.*, 2007; Konstantinovskaia y Malavieille, 2005 y 2011; Konstantinovskaya *et al.*, 2009; Koyi *et al.*, 2004; Kukowski *et al.*, 2002; Leever *et al.*, 2011a, entre otros).

2.3. Modelación analógica

A lo largo de más de 200 años de historia, la modelación analógica ha demostrado ser una herramienta confiable para la representación y análisis de procesos tectónicos a escala de laboratorio (Schellart y Strak, 2016). Desde la incorporación de la teoría del escalamiento, introducida por Hubbert (1937) y posteriormente discutida por otros autores (e.g. Hubbert, 1951; Ramberg, 1967 y 1981; Horsfield, 1977; Shemenda, 1983; Weijermars y Schmeling, 1986; Richard, 1991; Davy y Cobbold, 1991; Ribe y Davaille, 2013; Schellart y Strak, 2016; entre otros), esta metodología adquiere un carácter cuantitativo por medio del escalamiento de parámetros con tal de lograr la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el prototipo natural y el modelo de laboratorio (Hubbert 1937).

Para simular el comportamiento físico de las rocas sometidas a esfuerzos tectónicos, los modelos de laboratorio utilizan materiales análogos, que deben ser elegidos según la relación de escalamiento reológico entre el prototipo natural y el modelo (Schellart y Strak, 2016). Una gran variedad de materiales análogos (elástico, plástico y viscosos), y mezclas de estos, se han utilizado para representar el comportamiento del material natural sometido a fenómenos geológicos tanto en la corteza superior terrestre como en capas más

profundas (e.g. Davy y Cobbold, 1991).

En el caso de modelos analógicos que consideran procesos geodinámicos que afectan la corteza superior, el material utilizado por excelencia es el material granular, específicamente la arena de cuarzo (ver reseñas de Graveleau *et al.*, 2011; Dooley y Schreurs, 2012; entre otros), pues al igual que las rocas de la corteza frágil se deforma según el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Coulomb 1773) en que el estrés de cizalle aumenta de manera aproximadamente lineal con el estrés normal (Mandl *et al.*, 1977; Krantz, 1991; Schellart, 2000; Lohrmann *et al.*, 2003), según la siguiente ecuación:

$$\tau = c_0 + \mu_B \sigma_n \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde τ y σ_n son el estrés de cizalle y el estrés normal en un plano de falla, respectivamente, c_0 es la cohesión aparente y μ_B es el coeficiente de fricción interna (con $\mu_B = \tan(\phi)$, ϕ es el ángulo de fricción interna) del material fracturado. Según pruebas de cizalle y compresión uniaxial, las rocas frágiles corticales presentan un rango de cohesión entre 5 y 180 MPa y un ángulo de fricción entre 25 y 45°, respectivamente, dependiendo del tipo de roca (e.g. Lama y Vutukuri, 1978; Schellart, 2000). De manera que, al escalar la cohesión del material en la misma proporción que los estreses, se puede obtener la similitud dinámica entre el prototipo natural y el modelo (Horsfield, 1977; Davy y Cobbold, 1988; Cobbold y Jackson, 1992).

Se han utilizado otros materiales para representar la deformación de secuencias estratificadas de la corteza superior frágil; entre ellos, los más frecuentes son: polvo de feldespatos (e.g. Sokoutis *et al.*, 2005; Corti y Manetti, 2006; Corti, 2008; Luth *et al.*, 2013a; Calignano *et al.*, 2015), microesferas de vidrio (e.g. Colletta *et al.*, 1991; Leturmy *et al.*, 2000; Schellart *et al.*, 2002a y b, 2003, Rossi y Storti, 2003; Koyi y Vendeville, 2003; Konstantinovskaia y Malavieille, 2005; Hoth *et al.*, 2007; Autin *et al.*, 2010; Malavieille, 2010;

Villarroel 2016), polvo de sílice (e.g. Colletta *et al.*, 1991; Konstantinovskaia y Malavieille, 2005; Galland *et al.*, 2006; Bonnet *et al.*, 2007), polvo de arcilla (e.g. McClay, 1990; Krantz, 1991; Gartrell, 1997; Sherlock y Evans, 2001; Hampel *et al.*, 2004) y polvo de diatomita (Gressier *et al.*, 2010; Mourgues *et al.*, 2012), entre otros. Sin embargo, el tratamiento que se le ha dado al basamento cristalino o a cuerpos de mayor cohesión que el entorno, es generalmente de carácter rígido, mediante la ubicación de bloques indeformables de madera o láminas de aluminio (e.g. McClay, 1992; Yamada y McClay, 2003 y 2004; Mitra, 1993; Buchanan, 1991; entre otros), lo cual limita la generación y reactivación de estructuras a una geometría predeterminada otorgada por el material indeformable.

En este trabajo se modelará la presencia de cuerpos de alta cohesión ubicado en un entorno de material de cohesión despreciable a escala de modelo, con el fin de estudiar la influencia que ejerce su presencia, en el arreglo estructural posterior a un evento de deformación compresiva. Para lograrlo, se realizará un aumento de la cohesión del material analógico, el cual representará, por ejemplo, un cuerpo intrusivo deformable, mientras que el entorno, con cohesión despreciable, es representativo de secuencias estratificadas de la corteza superior a escala de los modelos analógicos.

2.3.1. Antecedentes sobre materiales cohesivos

En la literatura existe una gran variedad de trabajos de modelación analógica que hacen uso de materiales granulares secos de mayor cohesión (c_0) que la arena seca de cuarzo, y que han sido utilizados para representar, de manera eficiente, la deformación frágil de la corteza superior ante un evento de deformación. Uno de estos corresponde al polvo de sílice, que al presentar una alta cohesión, se ha empleado con el propósito de incrementar la resistencia del material analógico (Schellart y Strak, 2016). Con este material, se han

modelado procesos involucrados en la evolución de un prisma de acreción simulando material más resistente ($c_0=150\text{Pa}$) (e.g. Konstantinovskaia y Malaville, 2005; Bonnet, 2007). En el caso de Bonnet (2007) tanto el basamento como un horizonte calcáreo rígido presentan mayor cohesión en contraste con su entorno de baja cohesión conformado por arena y perlas de vidrio. Por otro lado, Galland (2006) emplea cristales de sílice para la representación de roca competente ($c_0=300\text{Pa}$) intercalada con esferas de sílice (roca menos competente, $c_0=10\text{Pa}$), para la modelación de una corteza frágil sometida a eventos de inyección de magma (representado por aceite vegetal). En este caso, el material de sílice funciona porque su gran cohesión permite la abertura de fracturas (e.g. hidráulicas) sin colapsar.

Otro material relativamente alto en cohesión es el polvo de arcilla, el cual, al igual que el polvo de sílice, es utilizado para incrementar la resistencia del material analógico (Schellart y Strak, 2016). Ellis y McClay (1988) alternan capas de arena con polvo de arcilla (kaolinita) para otorgar un contraste de competencia de manera de simular deformación en secuencias sedimentarias con alternancias litológicas. Otro ejemplo de esto, es el trabajo de McClay (1990) quien ejecuta la representación del contraste litológico con intercalación de capas de mica vermiculita y kaolinita. Otros autores han utilizado mezclas de arena de cuarzo con polvo de arcilla para aumentar la cohesión del material analógico (e.g. Krantz, 1991; Gartrell, 1997).

Aparte de los materiales granulares secos, existen trabajos en que se ocupa arcilla o arena húmeda para simular deformación frágil en corteza superior (Schellart y Strak, 2016). El humedecimiento del material genera una alza en su cohesión que depende del contenido de agua, que por lo general está poco constreñida y genera dificultades en su manejo de acuerdo a su variabilidad en el tiempo (Eisenstadt y Sims, 2005; Dooley y Schreurs, 2012).

2.4. Propuesta

Payrola (2012) ha utilizado una mezcla de arena y gelatina (arena gelatinizada) para simular basamento cristalino en la representación de pliegues oblicuos. Bureau (2014) da cuenta de que la concentración de gelatina controla la cohesión del material, donde un aumento de 1 g/l resulta en un incremento de 490 Pa en el material análogo. Esta mezcla funciona adecuadamente para representar capas o cuerpos de alta cohesión, debido a que, en términos reológicos mantiene las propiedades de fricción que otorga la arena, y aumenta la cohesión por la unión de granos producto de la incorporación de gelatina (Bureau, 2014).

Los materiales mencionados anteriormente, han sido utilizados exitosamente para representar el contraste de cohesión ya sea en secuencias estratificadas como en la evolución de prismas de acreción. Sin embargo, y como ya fue mencionado, los cuerpos resistentes como intrusivos o basamentos, han sido generalmente tratados como bloques indeformables que generan estructuras predeterminadas según su geometría (e.g. Buchanan, 1991; Yamada y McClay, 2004; entre otros). Siguiendo esta línea, en este trabajo se propone simular la presencia de cuerpos cohesivos deformables en una secuencia estratificada, con el objetivo de entender su influencia sobre el arreglo estructural, posterior a un evento compresivo. Para esto, se generan modelos analógicos de deformación compresiva que incluyen la presencia de cuerpos competentes con (1) variaciones en porcentajes arena-gelatina y (2) variaciones en la geometría y disposición. En este estudio se presentan las respectivas observaciones de la modelación, junto con el análisis comparativo entre los modelos y su relación con prototipos naturales.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Limitaciones del modelado análogo

A pesar de las ventajas que incorpora la técnica del modelado análogo respecto a la posibilidad de representar procesos tectónicos a escalas convenientes de laboratorio, se debe tener en cuenta las limitaciones propias de esta metodología para la correcta interpretación de los datos. Como primer alcance, resulta extremadamente difícil, si no imposible, confeccionar un modelo que sea completamente representativo de su prototipo natural a través del perfecto escalado de todas sus características. La materialización del diseño experimental o la elección de los materiales a utilizar son decisiones que involucran una simplificación del proceso geológico representado (Twiss y Moores, 2007). Así mismo, la complejidad de los sistemas naturales no se ve representada en las simplificaciones estructurales que se le imponen al modelo, en función de entender la influencia de ciertos parámetros en el desarrollo de los procesos estudiados.

Las condiciones de borde corresponden a otra de las limitaciones de la metodología en el sentido en que los experimentos se ejecutan en dimensiones restringidas, lo cual perturba la condición de similaridad entre el fenómeno representado y el modelo. Una táctica es ejecutar modelos lo suficientemente extensos como para que la zona de estudio esté lejana de los extremos y fuera del alcance de ciertos efectos de contorno (Twiss y Moores, 2007). Otra limitación surge al plantear el montaje original previo a la deformación, el cual tiene condiciones definidas que no necesariamente simulan las condiciones originales del proceso en estudio (eg. características del despegue basal, del muro móvil, del muro trasero, entre otras condiciones impuestas).

Los modelos análogos pueden entregar aproximaciones confiables si el escalamiento de parámetros es adecuado, no obstante, las limitaciones

específicas relacionadas con las experiencias, deben estar claras antes de interpretar sus resultados. En el caso de las experiencias expuestas en este estudio surge una limitación a considerar correspondiente al manejo del cuerpo cohesivo. Como se describe posteriormente, la elaboración de este cuerpo requiere una preparación previa a ser insertado en la configuración inicial del modelo. Esta preparación incluye, la mezcla y homogeneización de los materiales (arena/gelatina), el drenado del agua, estratificación del cuerpo dentro del molde, secado y colocación en el paquete granular. Cada una de estas etapas requiere un manejo delicado del material, el cual es propenso a sufrir deformación antes de ser insertado en su ubicación. Incluso luego de su ubicación, y al momento de extraer el molde del paquete granular, los granos de arena se acomodan, de acuerdo a la fuerza gravitatoria, alrededor del cuerpo recientemente incorporado. Todos los efectos del manejo de este cuerpo hasta su posición dentro del paquete granular pueden distorsionar el resultado de la deformación. Además, las experiencias de cohesión baja requieren dejar secando el cuerpo dentro del paquete granular, por la dificultad de su manejo debido a su fragilidad. Esto último, puede provocar el humedecimiento del material del entorno o el de la capa superficial, lo cual puede influir en el comportamiento del material.

Por último, la simplificación de estas experiencias omiten varios factores que sin duda existen en los prototipo naturales como la presión de poros, el gradiente térmico en profundidad, la presencia de materiales con reologías dúctiles, entre otros, como también la anisotropía vinculada con el dispositivo experimental. Sin embargo, la finalidad de estas experiencias es comprender de manera general el fenómeno investigado y no modelar una región en particular con sus infinitas complejidades.

3.2. Teoría del escalamiento *(basado en Twiss y Moores, 2007)*

Los prototipos naturales en conjunto con su historia de deformación,

ocurren en relaciones de espacio y tiempo que impiden dimensionar el comportamiento cinemático a través de la observación directa. Por esta razón, los modelos análogos surgen como una herramienta fundamental para entender la evolución estructural de la gran diversidad de situaciones geológicas presentes en la naturaleza. Para lograr describir el comportamiento mecánico de un sistema natural, el modelo se debe sostener sobre una serie de parámetros de escalamiento. Los cuales son el factor de escala espacial (Δ), el de masas (M) y el temporal (T), según las siguientes ecuaciones:

$$\Delta = \frac{L_m}{L_p}; T = \frac{t_m}{t_p}; M = \frac{m_m}{m_p} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde L corresponde a longitud, t es tiempo y m es la masa en el sistema, y los subíndices m y p se refieren al modelo y al prototipo respectivamente. Para que modelo y prototipo sean geométrica- y dinámicamente similares, cada dimensión de espacio y tiempo debe ser escalada según los factores Δ y T , respectivamente.

El resto de las cantidades mecánicas que intervienen en las experiencias pueden ser deducidas desde estos tres factores bases (Ec. 2). Algunas de estas, se mencionan en la Tabla 1, incluyendo el factor de escala que relaciona las fuerzas aplicadas en el modelo con respecto a las del prototipo natural ($M\Delta/T^2$), y que le otorga similitud dinámica.

Tabla 1: Factores de escala para variables involucradas en el sistema, extraído de Twiss y Moores, 2007.

Cantidad	Símbolo	Unidad	Razón de escala	Factor de escala
Longitud	L	L	$\frac{L_m}{L_p}$	Δ
Tiempo	t	t	$\frac{t_m}{t_p}$	T

Masa	m	m	$\frac{m_m}{m_p}$	M
Área	A	L^2	$\frac{A_m}{A_p} = \frac{(L_m)^2}{(L_p)^2}$	Δ^2
Volumen	V	L^3	$\frac{V_m}{V_p} = \frac{(L_m)^3}{(L_p)^3}$	Δ^3
Densidad	ρ	$\frac{m}{v}$	$\rho = \frac{\rho_m}{\rho_p} = \frac{m_m(L_p)^3}{m_p(L_m)^3}$	$\rho = \frac{M}{\Delta^3}$
Velocidad	v	$\frac{L}{t}$	$\frac{v_m}{v_p} = \frac{L_m/t_m}{L_p/t_p} = \frac{L_m t_p}{L_p t_m}$	$\frac{\Delta}{T}$
Aceleración	a	$\frac{L}{t^2}$	$\frac{a_m}{a_p} = \frac{L_m/t_m^2}{L_p/t_p^2} = \frac{L_m t_p^2}{L_p t_m^2}$	$\frac{\Delta}{T^2}$
Fuerza	F	$\frac{mL}{t^2}$	$\frac{F_m}{F_p} = \frac{m_m(L_m/t_m^2)}{m_p(L_p/t_p^2)} = \frac{m_m L_m t_p^2}{m_p L_p t_m^2}$	$\frac{M\Delta}{T^2}$
Esfuerzo	σ	$\frac{F}{L^2}$	$\Sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{F_m/A_m}{F_p/A_p} = \frac{F_m L_p^2}{F_p L_m^2}$	$\Sigma = \frac{M}{\Delta T^2}$

La definición de los tres factores de base implica la determinación de los otros factores utilizados para dar proporcionalidad entre el prototipo natural y el modelo. En base a esto, se produce una contradicción respecto al factor de fuerza en modelos generados bajo gravedad normal, para lo cual se han utilizado máquinas centrífugas para las experiencias donde la fuerza de gravedad es un factor significativo en la representación del sistema. Sin embargo, para el caso contrario, donde la fuerza de gravedad no juega un rol dominante, el factor de la aceleración es igual a uno, como o muestra la siguiente ecuación:

$$\Sigma = \frac{M}{\Delta T^2} = \frac{M}{\Delta^2} = \frac{M}{\Delta^3} = \sigma \Delta \quad (\text{Ec. 3})$$

donde g_m y g_p son la aceleración de gravedad del modelo y el prototipo respectivamente.

La deformación frágil en la corteza terrestre está regida por el criterio de falla Mohr-Coulomb (Ec. 1), que no incluye el tiempo, por tanto, el factor T no tiene implicancia en la deformación de materiales coulombianos. Las dos constantes contenidas en el criterio de falla corresponden al coeficiente de fricción interna (μ_B) y a la cohesión (c_o). El primero es una variable adimensional y por tanto su valor debe ser similar en el modelo y en el prototipo. El segundo se expresa en dimensiones de esfuerzo y debe ser escalado según dicho factor aplicando la ecuación (Ec.3):

$$\frac{g_m}{g_p} = \frac{\Delta}{T^2} = 1 \quad T = \Delta^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.4})$$

donde la densidad (p) de las rocas en el prototipo es equivalente a la densidad de los materiales análogos y por tanto, el factor de densidad es aproximadamente uno. Lo anterior aplicado en la ecuación (Ec.4) implica que la resistencia de los materiales queda determinada al definir el factor de escala espacial ($\Sigma = \Delta$).

La ejecución del modelado en el presente estudio se realiza bajo las consideraciones presentadas anteriormente, con lo cual se busca comparar la evolución estructural de una región deformada en presencia de cuerpos cohesivos que guarden un contraste de competencias con respecto a la roca encajante. Cabe mencionar que no es objetivo de este estudio lograr la similitud completa de un prototipo en particular, si no, comprender a grosso modo el comportamiento de la deformación ante cuerpos de mayor resistencia que su entorno.

3.3. Presentación de experiencias

Se realizaron un total de seis modelos de deformación compresiva que incluyen la presencia de cuerpos cohesivos insertos en medio del paquete de material granular. Los parámetros variables entre cada una de las experiencias corresponden al grado de cohesión del cuerpo, su geometría y disposición. En función de analizar la influencia de estos parámetros en la evolución estructural del sistema compresivo, se aumentó, como se explicó anteriormente, la cohesión del material análogo en dos grados catalogados como: bajo y alto. De la misma manera, se varió la geometría y/o disposición del cuerpo cohesivo en tres fases definidas como: cilíndrica, tabular alargado ortogonal a la dirección de acortamiento y tabular alargado oblicuo (45°) a la dirección de acortamiento.

3.3.1. Propiedades de los materiales

En la totalidad de las experiencias realizadas los materiales empleados fueron arena seca y arena seca gelatinizada. El primero simula la cobertura estratificada, y el segundo representa la presencia de un cuerpo más competente que su entorno (*eg.* intrusivo). Ambos materiales se comportan de acuerdo al criterio de falla Mohr-Coulomb (Krantz, 1991; Schellart, 2000; Bureau *et al.*, 2014).

Como ya ha sido mencionado, la arena natural de cuarzo es el material granular más común en la representación de procesos de deformación que actúan en la corteza superior. Sus propiedades mecánicas, como la cohesión y el ángulo de fricción interna, han sido estudiadas y validadas para estos propósitos por una gran variedad de autores (*e.g.* Krantz, 1991; Schellart *et al.*, 2000; Lohrmann *et al.*, 2003; Panien *et al.*, 2006; Gomes, 2013; entre otros).

En estas experiencias se utiliza la arena seca, tanto en el paquete de capas de color alterno simulando una secuencia de rocas estratificadas, como

en el material base de la mezcla de arena gelatinizada representando cuerpos de mayor cohesión insertos en el paquete original. Se utiliza arena seca de cuarzo de grano redondeado y buena selección, con tamaño menor a 600 micrones. La cohesión del material es despreciable, menor a 100 Pa, adecuada para un factor de escalamiento de 10^{-5} ($\Sigma=\Delta=10^{-5}$), y un ángulo de fricción interna de aproximadamente 33° (Tabla 2) (Yagupsky *et al.*, 2008; Jara *et al.*, 2014).

Por otro lado, el material cohesivo se logró a partir de la mezcla de arena seca de cuarzo con gelatina. La arena otorga las propiedades de fricción y en cambio la gelatina permite cementar los granos generando un material de mayor cohesión. Para ello, se utilizó AgarAgar gel (aditivo E406) proveniente del alga roja *Gracilaria verrucosa*. El Agar Agar en forma de polvo es soluble en agua hirviendo entre temperaturas de 95° y 100° , generando gel mientras se enfría. Esto permite adherir las partículas del material granular rellenando los intersticios como un pegamento (Bureau *et al.*, 2014).

Tabla 2: Propiedades de los materiales utilizados y proporción de gelatina en mezclas.

Material	Tamaño de granos (micrones)	Cohesión (Pa)	Ángulo de fricción interna	Proporción de gelatina (g/l)
Arena seca de cuarzo	<600	<100	$\sim 33^\circ$	-
Arena gelatinizada “baja”	<600	785 ± 50	$\sim 33^\circ$	1,5
Arena gelatinizada “alta”	<600	1520 ± 50	$\sim 33^\circ$	3

La gelatina ha sido utilizada generalmente para simular procesos de intrusión de material asumiendo un comportamiento elástico frágil simple (Di Giuseppe *et al.*, 2009). Entre los procesos de la corteza superior modelados se

encuentra la propagación de diques (Fiske y Jackson, 1972; McGuire y Pullen, 1989; Takada, 1990; Lister y Kerr, 1991; Takada, 1994; Koyaguchi y Takada, 1994; McLeod y Tait, 1999; Watanabe *et al.*, 1999; Bons *et al.*, 2001; Ito y Martel, 2002; Menand y Tait, 2002; Watanabe *et al.*, 2002; Walter y Troll, 2003; Pasquare' y Tibaldi, 2003; Acocella y Tibaldi, 2005), emplazamiento de lacolitos (Pollard y Johnson, 1973; Johnson y Pollard, 1973; Hyndman y Alt, 1987), generación de sills (Rivalta *et al.*, 2005; Kavanagh *et al.*, 2006) y crecimiento de burbujas en sedimento suave (Boudreau *et al.*, 2005). Sin embargo, la gelatina exhibe un comportamiento mucho mas complejo, controlado directamente por la concentración, temperatura y esfuerzo (Bot *et al.*, 1996a,b; Kavanagh y Ross-Murphy, 1998; Norziah *et al.*, 2006; Barrangou *et al.*, 2006; Di Giuseppe *et al.*, 2009; Bureau *et al.*, 2014).

Di Giuseppe *et al.* (2009) dan cuenta de un cambio gradual en el comportamiento de la gelatina con el aumento de la temperatura y esfuerzo, desde reología puramente elástica-frágil a visco-elástica-frágil a puramente viscosa. Por otro lado, Bureau *et al.* (2014), mediante ensayos oscilatorios para mezclas de variadas proporciones de arena/gelatina demuestran que para rangos de esfuerzo de cizalle bajo los 1000 Pa, el material análogo puede ser comparado con sedimento elástico-frágil. Además, a través de ensayos de cizalle sobre la mezcla de arena/gelatina, los mismo autores concluyen que un aumento en la concentración de gelatina de 1,0 g/l da como resultado un incremento de 490 Pa en la cohesión del material. Con lo cual se puede simular materiales naturales en un rango de 80 kPa a 15 MPa, dependiendo del factor de escala utilizado (entre 10^{-4} y $5 \cdot 10^{-5}$). Así mismo, existe un incremento en el coeficiente de fricción interna de 0,08 al aumentar la proporción de gelatina en 1 g/l.

Las dos proporciones de gelatina (baja y alta) fueron implementadas bajo el mismo procedimiento. Se hizo hervir el agua con la cantidad necesaria de polvo de gelatina. Posteriormente, la solución se mezcla suavemente con la arena de cuarzo de manera que la gelatina se esparza homogéneamente en el

material granular. La mezcla se presiona gentilmente para que la gelatina ocupe todos los intersticios y el material obtenga la densidad requerida. Se deja enfriar el material, logrando que se forme el gel, otorgando cohesión a la arena. Las proporciones de gelatina utilizadas son de 1,5 y 3,0 g/l, lo cual significa un incremento de cohesión en el material aproximado de 785 y 1470 Pa, respectivamente para representar un rango de rocas naturales entre los 50 y 150 MPa de acuerdo con el factor de escalamiento dinámico ($\Sigma=\Delta=10^{-5}$) (Tabla 2).

3.3.2. Aparato experimental y montaje

La ejecución de los modelos se realizó sobre una mesa de acero estructural ASTM36 especialmente diseñada para labores asociadas al modelamiento físico en el Laboratorio de Modelamiento Analógico de la Universidad de Santiago de Chile. Entre alguna de las características que posee dicha mesa, destaca un electroimán de 12V y 0,5A que se encarga de fijar el sistema montado del motor a la meza de acero para que no se produzcan movimientos no deseados en el desarrollo de las experiencias. Además, cuenta con un riel de suelo en 180° que permite orientar la deformación a conveniencia, como también con seis filas de nueve perforaciones de 1/2" a cada lado para la ubicación de pivotes u obstáculos según requerimientos de la aplicación (Fig. 6). La deformación está controlada por un sistema combinado de servo motor y servo driver los cuales son operados a través del software "Lexium 23 CT". La velocidad se define en dicho software por medio del modo "control de velocidad" en el cual se fijan las revoluciones por minuto (rpm) equivalentes a la velocidad requerida en la deformación del sistema (Anexo 1). El motor rota su eje acoplado a un tornillo sin fin que desplaza el muro móvil en la dirección impuesta deformando el material ubicado entre éste y un muro fijo.

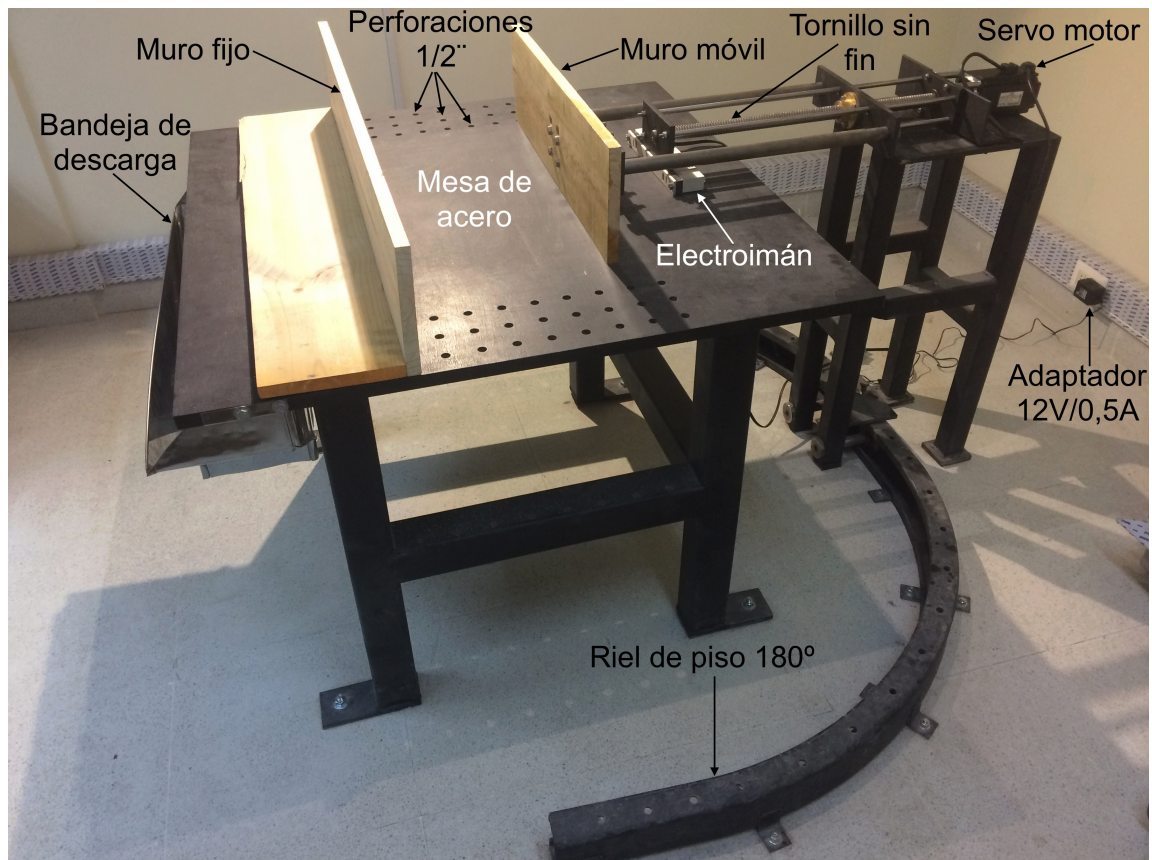


Fig. 6: Mesa de modelación y sus componentes principales.

La deformación superficial fue fotografiada desde el techo mediante una cámara digital Sony Ilce-5100 de 24 Megapíxeles operada con el celular a través de la aplicación móvil compatible. Al finalizar las experiencias, los modelos fueron humedecidos para ser seccionados en perfiles paralelos a la dirección de acortamiento, los cuales fueron fotografiados para extraer el registro de la deformación interna del sistema. Finalmente, el registro de las experiencias se integra al conjunto de datos para la elaboración del análisis y comparación de los modelos realizados.

El montaje experimental de la totalidad de las experiencias fue el mismo, con variaciones únicamente en la geometría, disposición y propiedades del cuerpo inserto dentro del paquete granular. Este último consiste en una secuencia de 3,3 cm de espesor de arena de cuarzo seca, conformado por

capas alternadas de 5,5 mm de negros y blancos de dicho material, abarcando un área de 55 x 45 cm (Fig. 7). El factor de escala espacial para las experiencias es de $\Delta=10^{-5}$, por tanto, un centímetro en el modelo corresponde a un kilómetro en el prototipo natural. Las dimensiones del modelo son lo suficientemente extensas para minimizar los efectos de borde, así mismo, que se prescindió de muros laterales para evitar el efecto del roce asociado a la fricción lateral.

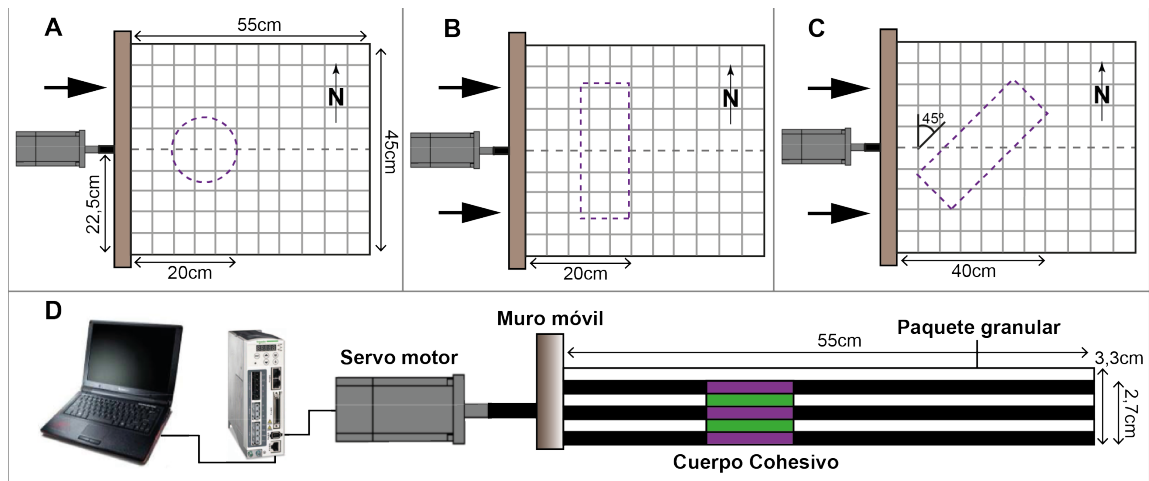


Fig. 7: A), B) y C) Vista en planta del montaje experimental según geometría y disposición del cuerpo cohesivo: cilindro, tabular paralelo y tabular oblicuo, respectivamente. D) Perfil esquemático del montaje experimental, corresponde a la traza ubicada en el centro del modelo y ortogonal al muro móvil, indicada en cada vista en planta con la línea gris punteada.

Con posterioridad a la construcción de la penúltima capa correspondiente al paquete granular, se insertó el molde vacío dentro de éste según la disposición y geometría requerida, y se succionó el material que quedó al interior del molde. Dentro de este, se ubicó un segundo molde, levemente más pequeño que el anterior, el cual contiene al cuerpo cohesivo (preparado con anterioridad según próximo párrafo). Finalmente, se retiraron los moldes suavemente, dejando el cuerpo inserto dentro del paquete granular, para generar una última capa de 0,55 cm que cubre el cuerpo. La función de la capa superficial es prevenir cualquier diferencia topográfica entre el cuerpo cohesivo y el paquete granular. Sobre esta última capa se agrega una grilla 5 x 5 cm, de

material oscuro (Fig. 8).

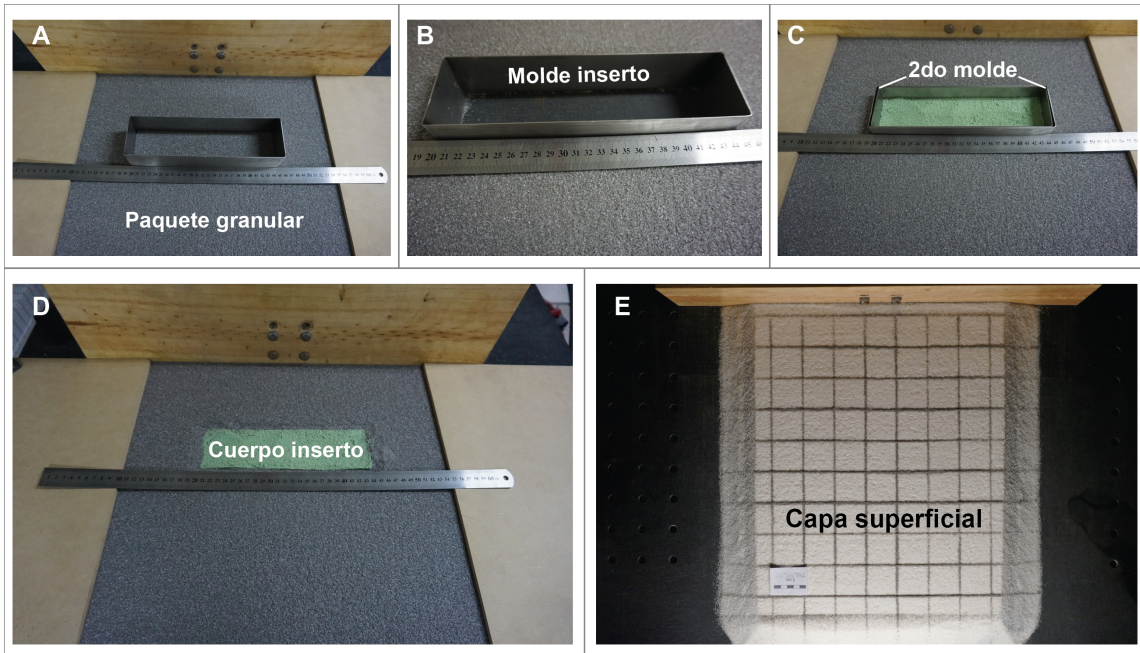


Fig. 8: Preparación del arreglo inicial. A) Vista en planta del paquete granular hasta la penúltima capa. B) Molde inserto posterior a la succión del material en su interior. C) Segundo molde inserto, el cual contiene al cuerpo cohesivo. D) Cuerpo inserto en el interior del paquete granular, posterior a la extracción de ambos moldes. E) Arreglo inicial original, con capa superficial cubriendo al cuerpo cohesivo y grilla 5 x 5 cm sobre esta.

Para preparar el cuerpo cohesivo se generó la misma mezcla de arena/gelatina para dos colores diferentes de arena en recipientes separados y se drenó el exceso de agua en ambos. Con estos materiales, se construyó una intercalación de capas de los dos colores dentro del molde hasta alcanzar un espesor de 3,3 cm (mismo espesor del paquete granular) y se dejó secando a temperatura ambiente por 24 horas. El material seco adquirió la forma del molde y la intercalación de colores ayuda a visualizar la deformación interna que sufre el material ante el evento compresivo.

El arreglo inicial consta del paquete granular de arena seca de cuarzo y un cuerpo inserto en su interior de arena gelatinizada según la proporción deseada, ambos estratificados con colores contrastantes entre ellos. En todas las experiencias, el arreglo inicial se deformó en régimen compresivo ortogonal a

través del desplazamiento del muro móvil a una velocidad constante de 9 cm/h durante una hora y media, correspondiente a un acortamiento total de aproximadamente 13,5 cm. El factor de escala de tiempo corresponde a $T=3,1 \cdot 10^{-11}$, por tanto cada segundo en el modelo representa 1000 años en el prototipo natural.

Las fotografías tomadas se integran a la batería de datos en conjunto con la información de espesor y pendiente final de la cuña de cada modelo, para ser comparadas y analizadas en los capítulos posteriores.

3.4. Metodología para el análisis de la deformación

El análisis de la deformación asociado a cada experiencia se realizó en base al registro fotográfico extraído, por un lado, durante la evolución del modelo y, por el otro, al término del acortamiento definido. En el primer caso, las imágenes son tomadas desde el techo, dando como resultado la vista en planta del desarrollo evolutivo superficial de la deformación, y en el segundo caso, las imágenes son tomadas lateralmente capturando el estado final del modelo a través de perfiles sobre la arena previamente hidratada y seccionada.

Para el análisis superficial se tomó en cuenta las características geométricas y temporales de las estructuras generadas, para lo cual se registró la evolución compresiva cada tres minutos en el modelo, lo cual según el factor temporal de escalamiento, representa 180 mil años en la naturaleza. Obteniendo de esta manera un total de 30 fotografías para comparar la evolución superficial entre cada uno de los modelos, de acuerdo al momento de ocurrencia, orientación y continuidad de las fallas generadas.

El análisis interno del resultado final de la deformación se realizó sobre doce secciones equidistantes. Las secciones son ortogonales al muro móvil y se disponen cada 2,5 cm, conforme a la posición de las rectas de la grilla 5 x 5 cm ubicada sobre la capa superficial (Fig. 9).

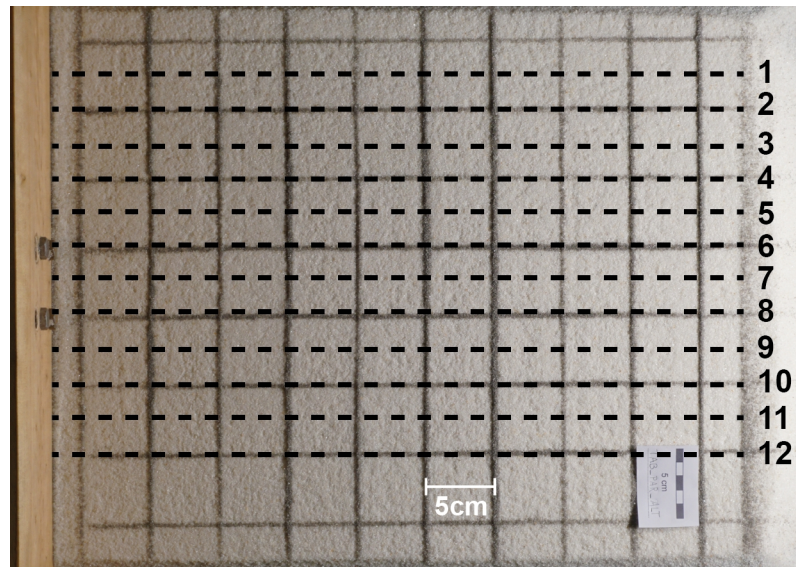


Fig. 9: Distribución de secciones para el análisis de la deformación interna en el estado final del sistema.

La finalidad de definir secciones es que el registro de los modelos sea comparable entre sí, a modo de poder extraer conclusiones de acuerdo al parámetro en cuestión. Para ello, se analizó la geometría de las estructuras, en cuanto a su continuidad, orientación y cantidad de estas, tanto en la vista en planta, como también al interior de los modelos a través de la superposición de las diferentes secciones.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes a las seis experiencias ejecutadas en este estudio, las cuales fueron codificadas según la abreviación de las variables a estudiar en relación al cuerpo inserto en el modelo. Los experimentos CIL_BAJ_01 y CIL_ALT_02 contienen cuerpos cilíndricos con proporción baja y alta de gelatina respectivamente, ambos ubicados en el centro del modelo. Así mismo, en los experimentos TAB_PAR_BAJ y TAB_PAR_ALT los cuerpos son tabulares paralelos al muro móvil con proporción baja y alta de gelatina respectivamente. Finalmente, los experimentos TAB_OBL_BAJ y TAB_OBL_ALT incorporan en el interior del paquete granular cuerpos tabulares oblicuos al muro móvil (45°) con proporción de gelatina baja y alta respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3: Codificación de la totalidad de las experiencias con las características del cuerpo inserto en cada modelo.

Código	Proporción de gelatina (g/l)	Geometría	Disposición según muro móvil
CIL_BAJ_01	1,5	Cilindro	Centro
CIL_ALT_02	3	Cilindro	Centro
TAB_PAR_BAJ	1,5	Prisma tabular	Paralelo
TAB_PAR_ALT	3	Prisma tabular	Paralelo
TAB_OBL_BAJ	1,5	Prisma tabular	Oblicuo (45°)
TAB_OBL_ALT	3	Prisma tabular	Oblicuo (45°)

Para facilitar la presentación e interpretación de los resultados se define una orientación arbitraria para la totalidad de los modelos, donde la deformación compresiva progresa de W a E, generando estructuras de rumbo N-S (perpendiculares a la dirección de esfuerzo).

A continuación se presentan las observaciones extraídas a partir del registro fotográfico de las experiencias. Cada modelo cuenta con una

descripción detallada en relación a dos aspectos: 1) la evolución superficial según vista en planta, y 2) el resultado final de acuerdo a vista de perfil. Conforme a esto, se identifican y enumeran las estructuras en función de su orden de ocurrencia en la evolución superficial del modelo, respetando dicha nominación en las secciones transversales correspondientes al estado final de la deformación.

4.1. Modelo CIL_BAJ_01

4.1.1. Evolución superficial (vista en planta)

Luego de iniciado el experimento, la primera evidencia de deformación comienza a manifestarse a los 0,9 cm de acortamiento con la formación de una primera falla inversa (F1) de rumbo aproximado N-S (Fig. 10A). Dicha falla se encuentra aproximadamente a 8 cm al E del muro móvil y no alcanza superficialmente el sector donde se ubica el cuerpo cilíndrico.

Una segunda falla inversa (F2) se desarrolla entre los 2,2 y 3,2 cm de acortamiento, la cual presenta un rumbo aproximado N-S en sus extremos, pero en el centro toma una forma cóncava siguiendo la geometría del cuerpo cohesivo, pero sin cortarlo en superficie (Fig. 10B). Junto con la generación de esta nueva estructura, existe una flexión en el rumbo de F1 en su parte central, siguiendo, al igual que F2, la curvatura del cuerpo cilíndrico. Dado esto, el alzamiento en la zona central genera mayor pendiente que en los extremos donde las fallas se encuentran más espaciadas entre sí.

Entre los 4 y 5,4 cm de acortamiento se desarrolla una tercera falla inversa (F3), cuyo rumbo se curva, adaptándose a la geometría circular del cuerpo y emplazada superficialmente por encima de este último en su zona central (Fig. 10C). Casi de manera sincrónica, se evidencia la generación de una incipiente falla inversa (F4) ubicada en el borde E del cuerpo cilíndrico,

adquiriendo la geometría circular del área del cuerpo como su rumbo.

A los 6,8 cm de acortamiento, la estructura del borde del cuerpo cilíndrico (F4) se muestra bien desarrollada; a partir de este punto, la deformación inducida por el desplazamiento del muro móvil en la zona central del modelo, va a ser trasladada al E de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo (Fig. 10D). Como consecuencia de esto, se genera una planicie circular en la zona superficial por encima de dicho cuerpo.

Posteriormente, entre los 7,5 y 9,4 cm de acortamiento, la estructura generada en el borde del cuerpo registra un notable alzamiento en el centro del modelo, generando un aumento de pendiente en el sector, y logrando expandir su traza hacia los extremos del modelo adoptando un rumbo aproximado N-S (Fig. 10E).

En la última etapa de deformación, con un acortamiento entre 10,5 y 13,5 cm, se genera una segunda falla inversa (F5) al E del cuerpo cohesivo, la cual en el centro toma el rumbo del borde de la circunferencia de dicho cuerpo (Fig. 10F). Esta última estructura (F5) tiene un comportamiento del rumbo disímil en los extremos del modelo; en su zona N se muestra bien desarrollada y con poco espaciado respecto a las estructuras previamente formadas, pero en su zona S la estructura no se logra desarrollar hasta los bordes del modelo y mantiene mucho mayor espaciado con respecto a las estructuras generadas previamente en el sector.

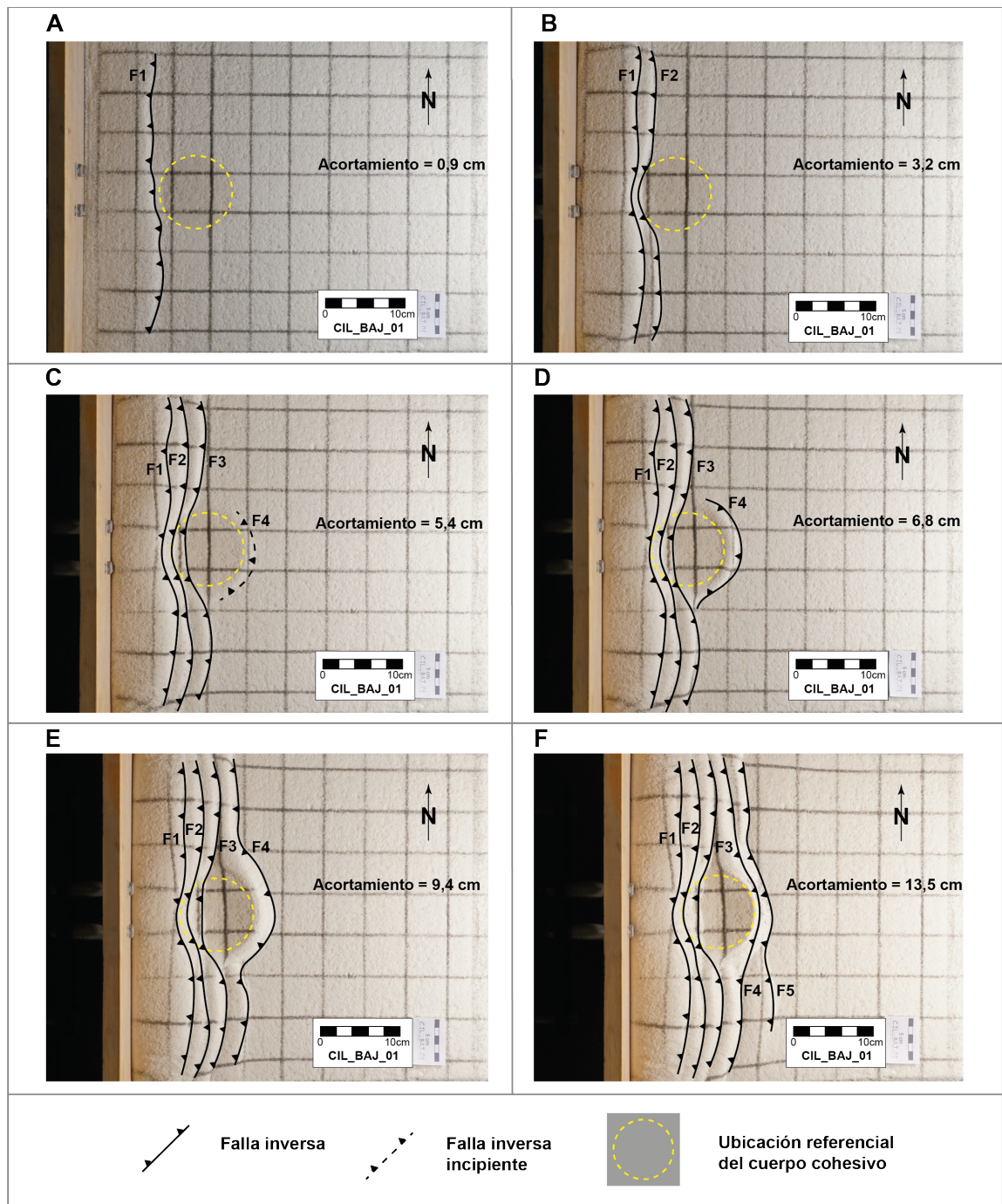


Fig. 10: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial

del modelo CIL_BAJ_01 según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.

4.1.2. Estado final (vista de perfil)

La imagen de la figura 10F muestra el estado final del experimento, la cual se replica en la figura 11H, donde se marca la traza de las secciones interpretadas en el resto de los cuadros de la misma figura (Fig. 11A-G). A modo de síntesis, los rasgos estructurales principales corresponden a cinco fallas inversas en secuencia, cuyos rumbos adoptan la geometría circular del cuerpo dependiendo de la ubicación y proximidad que guarden con este último. En relación a esto, la serie de fallas en sus sectores extremos (N y S), se comportan relativamente similares con un rumbo aproximado N-S. Pero en cuanto al sector central, las tres primeras fallas (F1, F2 y F3) presentan rumbo curvo con su lado cóncavo enfrentando el E del modelo y las dos últimas (F4 y F5) presentan una curvatura contraria en su rumbo, con su lado convexo enfrentando el E (Figs. 10F y 11H). Precisamente, son estas dos últimas fallas las que cortan el cuerpo en profundidad, logrando desplazar el material que conforma el bloque colgante hacia el E, y por tanto, aflorando en el borde oriental del cuerpo seccionado (Fig. 11D y E).

En las distintas secciones del modelo (Fig. 11A-G), al acercarse al centro desde los extremos, se hace cada vez más evidente que el espaciamiento entre las tres primeras fallas (F1, F2 y F3) y las dos últimas (F4 y F5) se hace mayor, y por consecuencia, se genera una altiplanicie inclinada hacia el E por sobre el área del cuerpo cohesivo. Estos dos grupos de fallas tienen un comportamiento diferente entre sí alrededor de la zona central del modelo. El primer grupo, conformado por F1, F2 y F3, no corta el cuerpo en profundidad y forma una primera cuña de acreción de 9,1 cm de altura máxima, que limita en su parte más baja con la intersección entre F3 y la altiplanicie por sobre el cuerpo. La pendiente de esta cuña es mayor en la parte central, que es

justamente el sector donde el trío de fallas se encuentra menos espaciado entre sí, y pierde el escalonamiento gradual característico de los extremos N y S del modelo (Fig. 11A-G). El segundo grupo (F4 y F5) corta en profundidad al cuerpo cohesivo, aflorando en su borde oriental, tal como fue mencionado, generando una segunda cuña de acreción, menos desarrollada que la anterior, con 6,1 cm de altura máxima y ubicada en el lado opuesto de la altiplanicie (Fig. 11B, C, D y E). Este par de fallas, presentan un trazado relativamente largo en el perfil, partiendo desde el lado W del cuerpo cohesivo y cruzándolo completamente hacia el lado contrario, a lo largo del cual se logra poner en contacto material de dicho cuerpo por sobre el material del paquete granular (Fig. 11D y E).

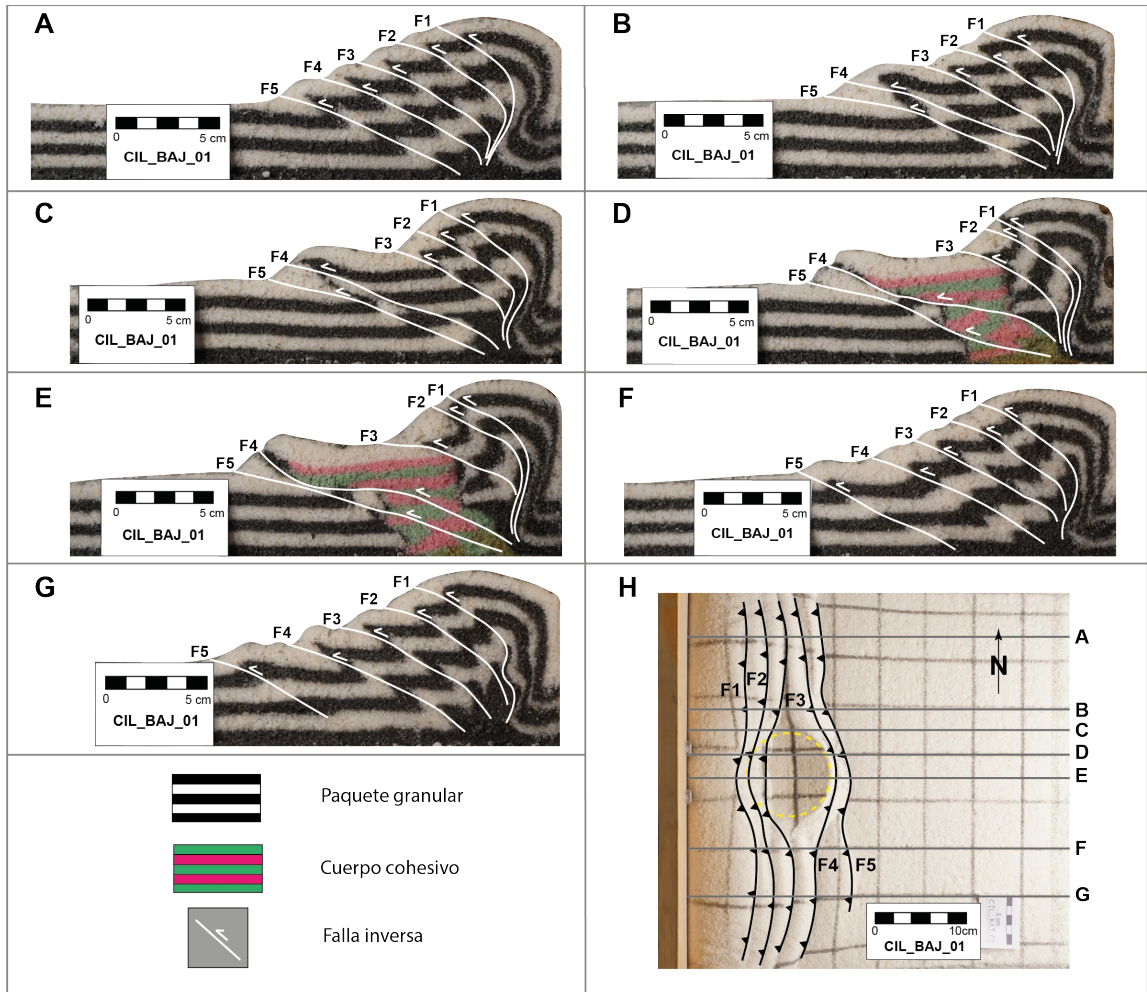


Fig. 11: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E)

correspondientes al estado final del modelo CIL_BAJ_01. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 10. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.

4.2. Modelo CIL_ALT_02

4.2.1. Evolución superficial (vista en planta)

El primer indicio de deformación comienza a evidenciarse a través de la generación de una primera falla inversa (F1) entre los 0,9 y 1,8 cm de acortamiento (Fig. 12A). Esta se encuentra a 9 cm promedio al E del muro móvil y mantiene un rumbo aproximado N-S. Su traza está emplazada justo en el borde W de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en superficie.

Una segunda falla inversa (F2) se genera entre los 2,8 y 3,6 cm de acortamiento, con un rumbo aproximado N-S, pero, de traza ondulada con su lado cóncavo enfrentando el E, adaptándose al borde W del área circular del cuerpo cohesivo en la parte central del modelo (Fig. 12B). A medida que avanza el acortamiento, se observa que la traza de F1 se va curvando, con lo cual adopta una geometría similar a F2, de manera que las trazas del par de fallas se mantienen aproximadamente paralelas entre sí, no obstante, la separación entre ellas es mayor en los extremos que en el centro. F2 aflora por sobre la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en superficie, alrededor de la zona W de dicho cuerpo.

A los 5,8 aparece bien desarrollada una tercera falla inversa (F3) con un rumbo de estilo similar a F2 pero con una curvatura más acentuada, tanto en la parte central (cóncava enfrentando el E), como en sus extremos (convexo enfrentando el E) (Fig. 12C). En relación a esto, el espaciamiento entre el trio de fallas en la zona central es notablemente menor que en los extremos, donde se duplica el distanciamiento entre las estructuras. Esta última falla se sitúa por sobre la ubicación referencial del cuerpo, pasando aproximadamente, por el

medio de su área superficial en el centro del modelo.

Entre los 7,8 y 9,5 la deformación superficial se desplaza al E de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, desarrollando una cuarta falla (F4) situada a 5 cm promedio en la misma dirección (Fig. 12D). Esta falla presenta un rumbo aproximado N-S en el centro y N del modelo, pero en su extremo S se curva levemente hacia el W. Consecuencia de lo anterior, F4 muestra una distancia cercana a 8 cm en relación a F3 en su extremo N; mientras que en su extremo S, esta distancia no sobrepasa los 3 cm. En este punto, se aprecia también un hundimiento de forma circular en la superficie situada por sobre la ubicación referencial del cuerpo cohesivo.

En la etapa final del modelo, entre los 12 y 13,5 cm de acortamiento, se desarrolla una quinta falla inversa (F5) 2 cm al E de F4 (Fig. 12E y F). Esta no logra alcanzar completamente los extremos del modelos, y su rumbo aproximado N-S se curva levemente de forma convexa hacia el E. En este último estadio de la deformación también se genera el afloramiento de material de una capa interior del paquete granular debido a la actividad de F4. Este material cae por gravedad y se posa en la pendiente generada entre F4 y F5 en la parte central del modelo (Fig. 12E y F en rojo).

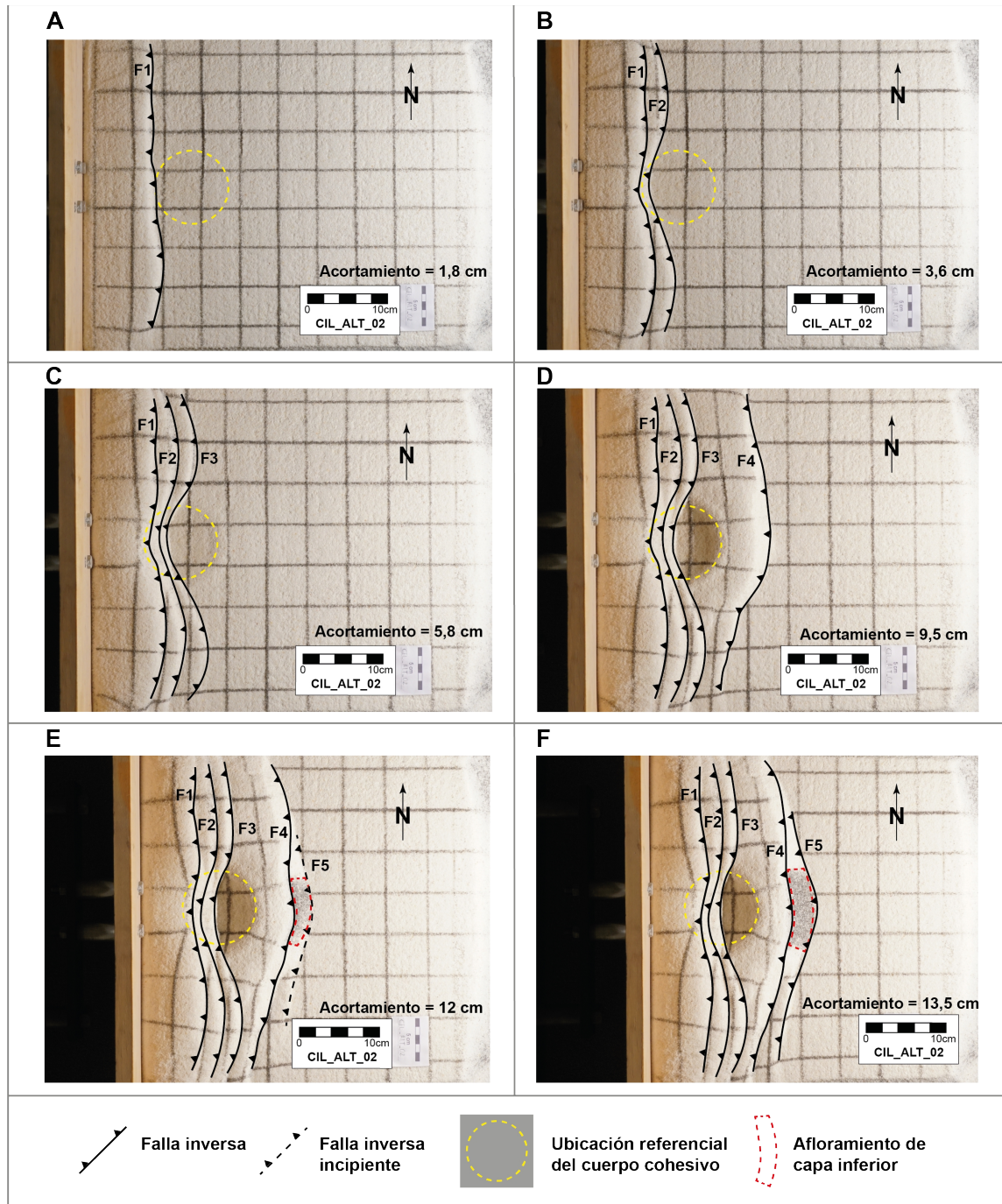


Fig. 12: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo CIL_ALT_02 según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.

4.2.2. Estado final (vista de perfil)

El estado final de la experiencia se muestra en la imagen de la figura 12F y es reproducida también en la figura 13H, incluyendo las trazas de los cortes efectuados sobre el resultado final de la modelación, y expuestos en el resto de imágenes en la figura 13 (Fig. 13A-G). Los rasgos estructurales principales de este modelo corresponden a 5 fallas inversas en secuencia, de rumbo aproximado N-S con leves curvaturas según cercanía con la ubicación referencial del cuerpo cohesivo. Alrededor del centro del modelo se observan dos montículos o cuñas de acreción, separadas por el cuerpo cohesivo, y que a su vez, dividen en dos las estructuras generadas en la deformación (Fig. 13B-F).

La primera cuña de acreción, ubicada próxima al empuje, alcanza una altura máxima de 8,6 cm y está conformada por las tres primeras fallas inversas (F1, F2 y F3), las cuales nacen en profundidad al W del cuerpo cohesivo y afloran por sobre la capa superficial que cubre dicho cuerpo (Fig. 13C-E). Sus trazas son relativamente paralelas entre sí con rumbo curvado y cóncavo hacia el E en el centro (Figs. 12F y 13H). A medida que los perfiles se acercan al centro se observa que las fallas (F1, F2 y F3) se juntan cada vez más y por tanto, se pierde la naturaleza escalonada que exhiben los escarpes en los extremos (Fig. 13A-G). En relación a esto, la pendiente de la primera cuña tiene mayor inclinación en el centro que en los extremos N y S del modelo. Por otro lado, ninguna de estas fallas secciona el cuerpo cohesivo en profundidad. La última de estas tres (F3) cabalga por encima del cuerpo y de la capa superficial que lo cubre, aflorando en lo que es el límite inferior de la primera cuña de acreción (Fig. 13D y E).

La segunda cuña de acreción de 6,9 cm de altura máxima, está conformada por las dos fallas restantes (F4 y F5), las cuales nacen en profundidad por debajo del cuerpo cohesivo y afloran al E de este mismo (Fig. 13B-E). El rumbo del par de fallas es aproximadamente N-S con una leve curva convexa enfrentando hacia el E, curvatura que es más pronunciada en F5 (Figs. 12F y 13H). A diferencia de la primera cuña, el espaciamiento entre el par de

fallas es mayor en el centro que en los extremos. En el sector central del modelo y más próximo al cuerpo, los perfiles muestran que ambas fallas (F4 y F5) se ramifican desde un plano compartido, el cual nace por debajo del cuerpo cohesivo desplazándolo intacto por encima del paquete granular hacia el E del modelo. Esto hace que el cuerpo se incline hacia el W a medida que se cabalga a lo largo del plano de falla (Fig. 13D y E).

El alzamiento de la segunda cuña alcanza una altura cercana al de la primera, dejando una depresión con forma de “v” entre las dos; depresión que en su flanco occidental tiene la pendiente de la primera cuña y en su flanco oriental tiene la capa superficial por sobre el cuerpo cohesivo inclinada al W (Fig. 13C-E).

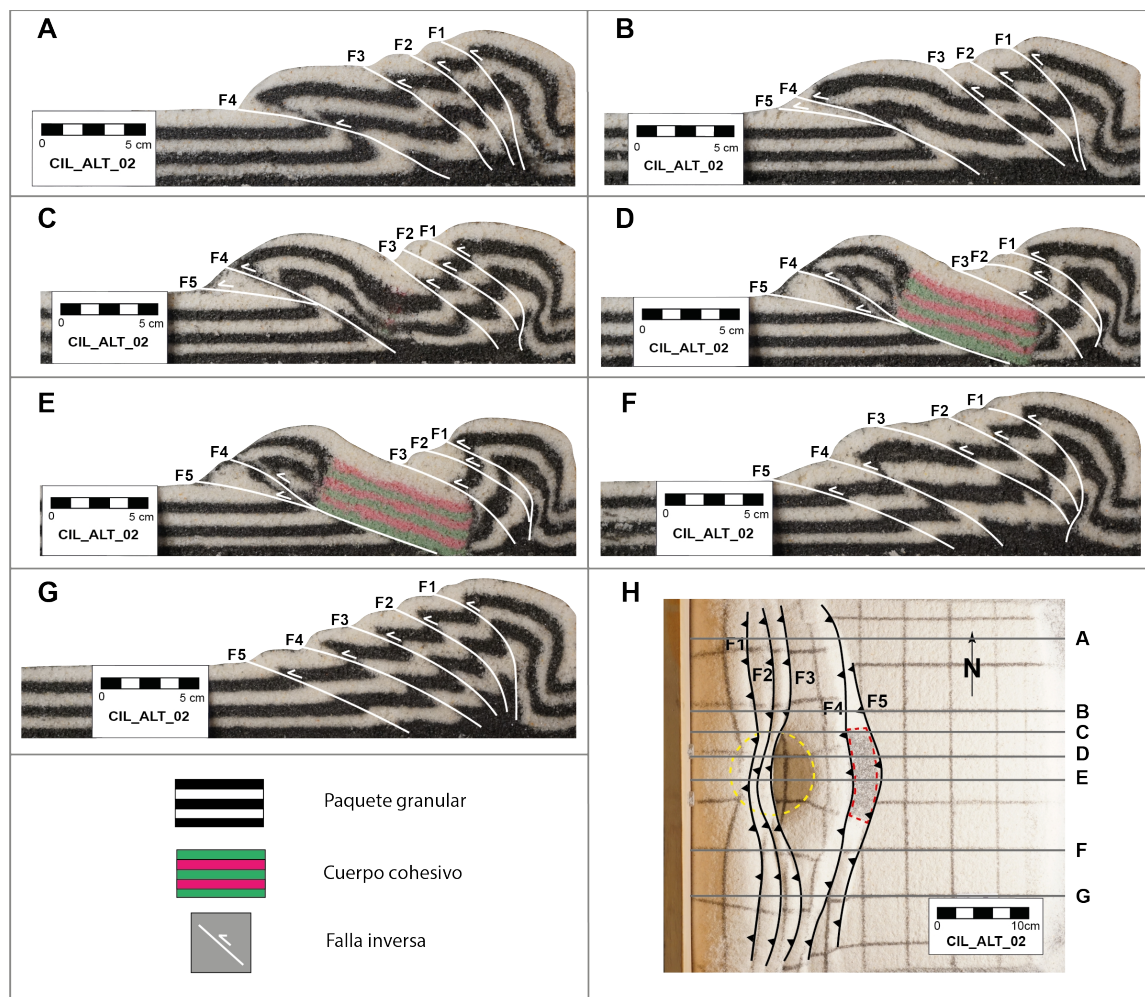


Fig. 13: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo CIL_ALT_02. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 12. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.

4.3. Modelo TAB_PAR_BAJ

4.3.1. Evolución superficial (vista en planta)

Después de iniciada la experiencia, una primera evidencia de deformación se materializa a los 1,8 cm de acortamiento con la aparición de una primera falla inversa (F1) de rumbo aproximado N-S (Fig. 14A). Esta se encuentra a 8 cm promedio al E del muro móvil y a 3 cm promedio al W de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo sin alcanzarlo en superficie.

Una segunda falla (F2) se desarrolla entre los 2,5 y 3,2 cm de acortamiento, situada entre medio de F1 al W de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo al E (Fig. 14B). Su rumbo aproximado es N-S, pero con una leve curvatura frente a la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, adoptando una traza cóncava enfrentando el E del modelo. La separación del par de fallas es mínima (menor a 1 cm) en el centro del modelo, y se hace mayor en los extremos N y S donde el espaciamiento alcanza hasta 2 cm de distancia.

A los 8,1 cm de acortamiento alcanza a desarrollarse una tercera falla (F3) de rumbo curvado adaptado a la geometría rectangular del área superficial del cuerpo cohesivo en su zona central y que en sus extremos se dispone N-S al igual que las estructuras precedentes (Fig. 13C). Esta falla se sitúa en el borde oriental de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en la región central del modelo, evidenciando el alzamiento de dicho borde, y en consecuencia, dejando el área superficial del cuerpo como una especie de altiplano limitado por F2 y F3, en el W y E respectivamente. El espaciamiento de F3 con respecto a F2 es mínimo en los extremos (~1 cm), pero mucho mayor alrededor de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, donde alcanza un promedio de 8 cm de distancia entre el par de fallas.

Posteriormente, se evidencia una ramificación de F3 en los extremos a los 10,3 cm de acortamiento (Fig. 14D). Esta ramificación alcanza mejor desarrollo en el extremo N, donde la traza adopta un rumbo curvo pero aproximado N-S. En el extremo S, solo se puede observar la generación de una incipiente falla inversa de rumbo N-S.

En la etapa final de deformación de la experiencias, entre los 12,2 y 13,5 cm de acortamiento, se genera la cuarta y ultima falla (F4) de la secuencia (Fig. 14E y F). F4 se encuentra relativamente lejos en dirección E de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, donde en la parte central alcanza hasta 10 cm de separación con ésta. Corresponde a una traza curva y convexa hacia el E en toda su extensión, solo en los extremos N y S adopta levemente un rumbo N-S. En 1,3 cm de acortamiento, F4 alcanza un gran alzamiento del bloque colgante, evidenciando un notable escarpe de falla hacia el final de la experiencia a los 13,5 cm de acortamiento (Fig. 14F). La distancia entre F4 y F3 es relativamente constante con aproximadamente 8 cm de separación entre este par de fallas.

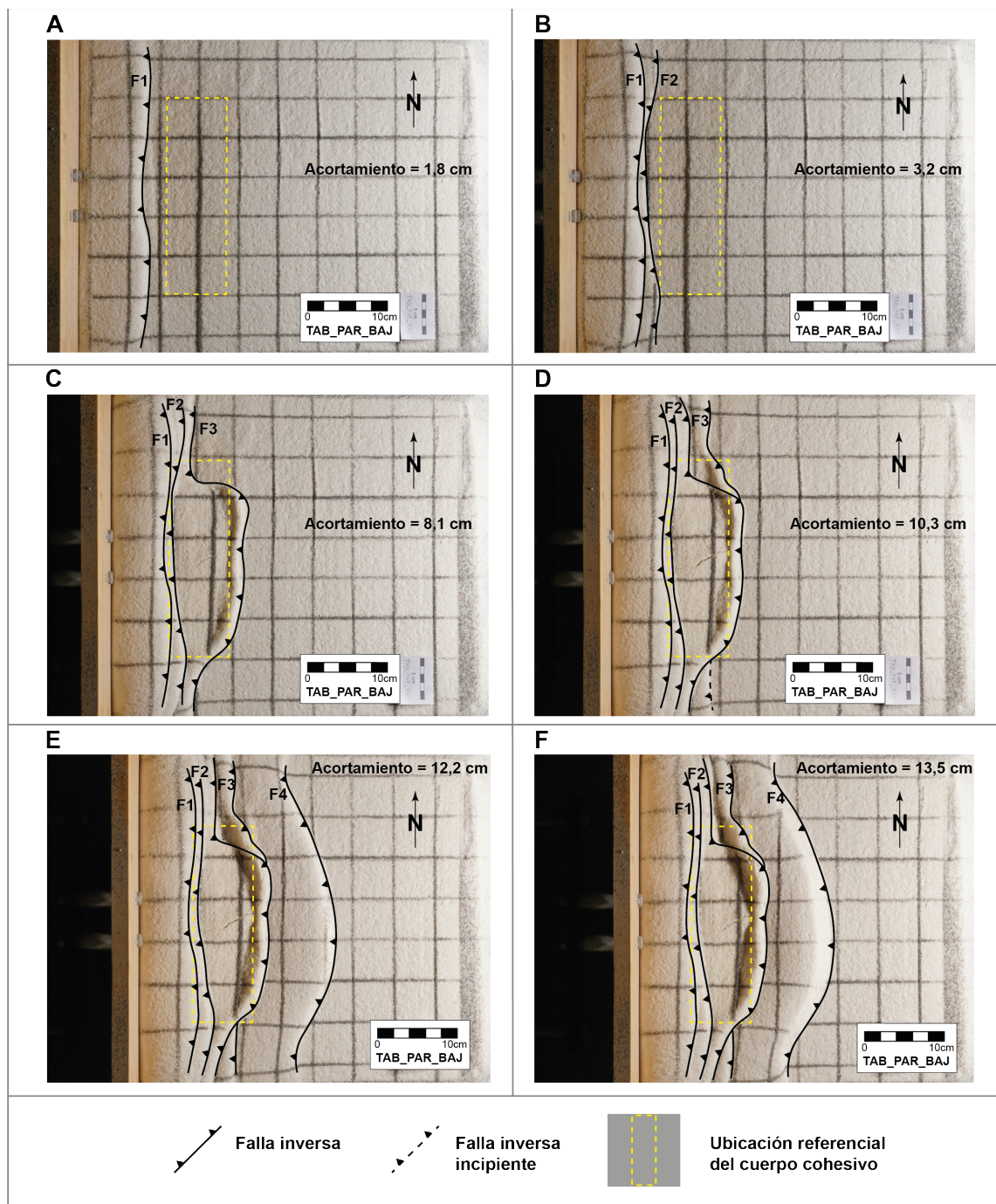


Fig. 14: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_PAR_BAJ según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.

4.3.2. Estado final (vista de perfil)

La imagen de la figura 14F muestra el estado final de la experiencia luego de 13,5 cm de acortamiento, la cual repite en la figura 15H incluyendo las trazas del registro en perfil del resultado final de la modelación que se presentan en el resto de las imágenes de dicha figura (Fig. 15A-G). Los rasgos estructurales principales de la experiencia corresponden a cuatro fallas inversas en secuencia, de las cuales las 3 primeras nacen en profundidad al W del cuerpo cohesivo y solo una se genera lejana y al E de dicho cuerpo.

En los extremos del modelo, las tres primeras fallas (F1, F2 y F3) tienen un comportamiento similar, rumbos aproximadamente N-S, ubicadas relativamente cercanas entre ellas y forman parte de una primera cuña de acreción de 8,8 cm de altura máxima (Fig. 15A y G). Entre estas fallas se incluye también las que aparecen debido a la ramificación de F3 en los extremos del modelo, alcanzando mucho mayor desarrollo en el extremo N (Fig. 15A, B y H). El escenario se hace más complejo en las cercanías del cuerpo, donde F1 y F2 disminuyen levemente su distancia de separación pero mantienen el rumbo y su posición respecto al cuerpo sin cortarlo en profundidad (Fig. 15B-F). Por otro lado F3, sufre una separación notable con respecto al par de fallas anteriores en el centro del modelo, con una gran traza en perfil que corta y desplaza el cuerpo a lo largo de su plano, y que aflora en el borde oriental de la ubicación referencia del dicho cuerpo (Fig. 15C-F). Justo por detrás de F3, hacia el W se advierte un promontorio de material desplazado por dicha falla, el cual se ubica en el borde oriental de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo. A diferencia de el par de fallas anteriores que presentan un manteo empinado en profundidad pero menos inclinado en superficie, F3 mantiene un manteo relativamente estable con un leve curvatura en el sector que corta al cuerpo cabalgándolo por encima de este mismo y de su capa superficial (Fig. 15C-F).

Hacia el E del modelo y lejana a la ubicación referencial del cuerpo, aflora F4, la única integrante de una segunda cuña de acreción de 5,9 cm de altura máxima, generada en la parte más oriental del modelo (Fig. 15A-G).

Incluso en los cortes más extremos, donde no hay rastro visible del cuerpo, F4 siempre aparece guardando gran distancia del trío de fallas anteriores (Fig. 15A y G). F4 nace en profundidad al E del cuerpo cohesivo sin deformarlo directamente, manteniendo un manteo arqueado que aflora con bajo ángulo hacia el E del modelo. Entre la parte inferior de la primera cuña y el inicio de la segunda, se genera una altiplanicie en el sector superficial de la ubicación referencial del cuerpo, que es interrumpido por F3 y su promontorio relacionado al desplazamiento de material.

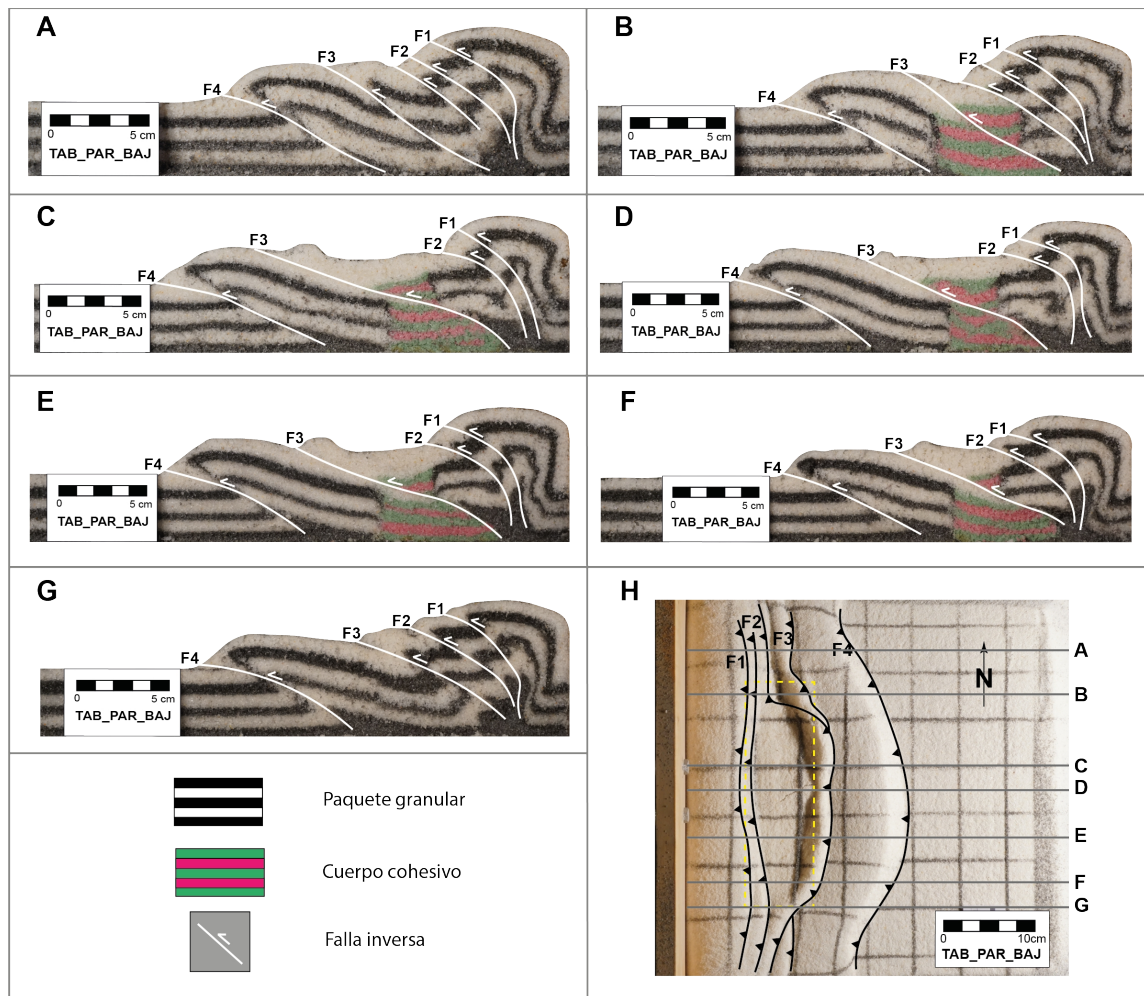


Fig. 15: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_PAR_BAJ. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 14. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.

4.4. Modelo TAB_PAR_ALT

4.4.1. Evolución superficial (vista en planta)

La primera evidencia de deformación, luego de iniciado el experimento, comienza a evidenciarse con el desarrollo de una primera falla inversa (F1) a los 1,8 cm de acortamiento (Fig. 16A). F1 está ubicada a 9 cm promedio del muro móvil y presenta un rumbo aproximado N-S con un leve arco convexo hacia el E, en el sector centro norte del modelo. El sector de la variación de rumbo se emplaza por sobre la superficie de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo a diferencia del resto de la traza. Otra ocurrencia de este estadio, corresponde a la aparición incipiente de una segunda falla inversa (F2), la cual presenta un rumbo aproximado N-S y se emplaza frente al sector con la variación de rumbo en F1.

A los 4,5 cm de acortamiento, la segunda falla (F2) logra desarrollarse en toda su extensión exhibiendo un rumbo aproximado N-S y ubicada a 2 cm promedio al E de F1 (Fig. 16B). Solo en el sector con la variación de rumbo en F1, la separación entre el par de fallas es la mitad que en el resto de las trazas. F2 se sitúa por sobre la superficie de la ubicación referencial del cuerpo.

Una tercera falla inversa (F3) aparece plenamente desarrollada en toda su extensión a los 6,8 cm de acortamiento, con un rumbo paralelo a F2 y a 1,2 cm promedio hacia el E de esta última (Fig. 16C). Esta última falla limita con el borde occidental de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en superficie y genera gran alzamiento del bloque anterior a dicho cuerpo, evidenciando un aumento de la pendiente entre F1 y F3. El espaciamiento entre estas dos últimas es relativamente constante y no supera los 4 cm de distancia a lo largo de toda la extensión de sus trazas.

Posteriormente la deformación se desplaza al E del cuerpo cohesivo, generando una cuarta falla inversa (F4) en el borde oriental del cuerpo luego de

los 9,9 cm de acortamiento (Fig. 16D). Con un rumbo arqueado hacia el W en los extremos y N-S aproximadamente en el centro, F4 no logra emplazar el sector referencial de la ubicación del cuerpo cohesivo. La separación entre F3 y F4 es relativamente constante en el sector en que el cuerpo se ubica entremedio, con 9 cm de distancia en dirección E.

En la etapa final de la deformación, entre los 11,8 y 13,5 cm de acortamiento, se empieza a desarrollar una quinta falla inversa (F5) desde el centro (Fig. 16E) hasta lograr extensión completa en el modelo (Fig. 16F). F5 adopta el rumbo de una larga curva convexa hacia el E, el cual es homologado por F4 que pierde su traza recta en el sector central. F5 se ubica a un promedio de 1 cm hacia el E de F4, distancia que disminuye hacia los extremos de la traza.

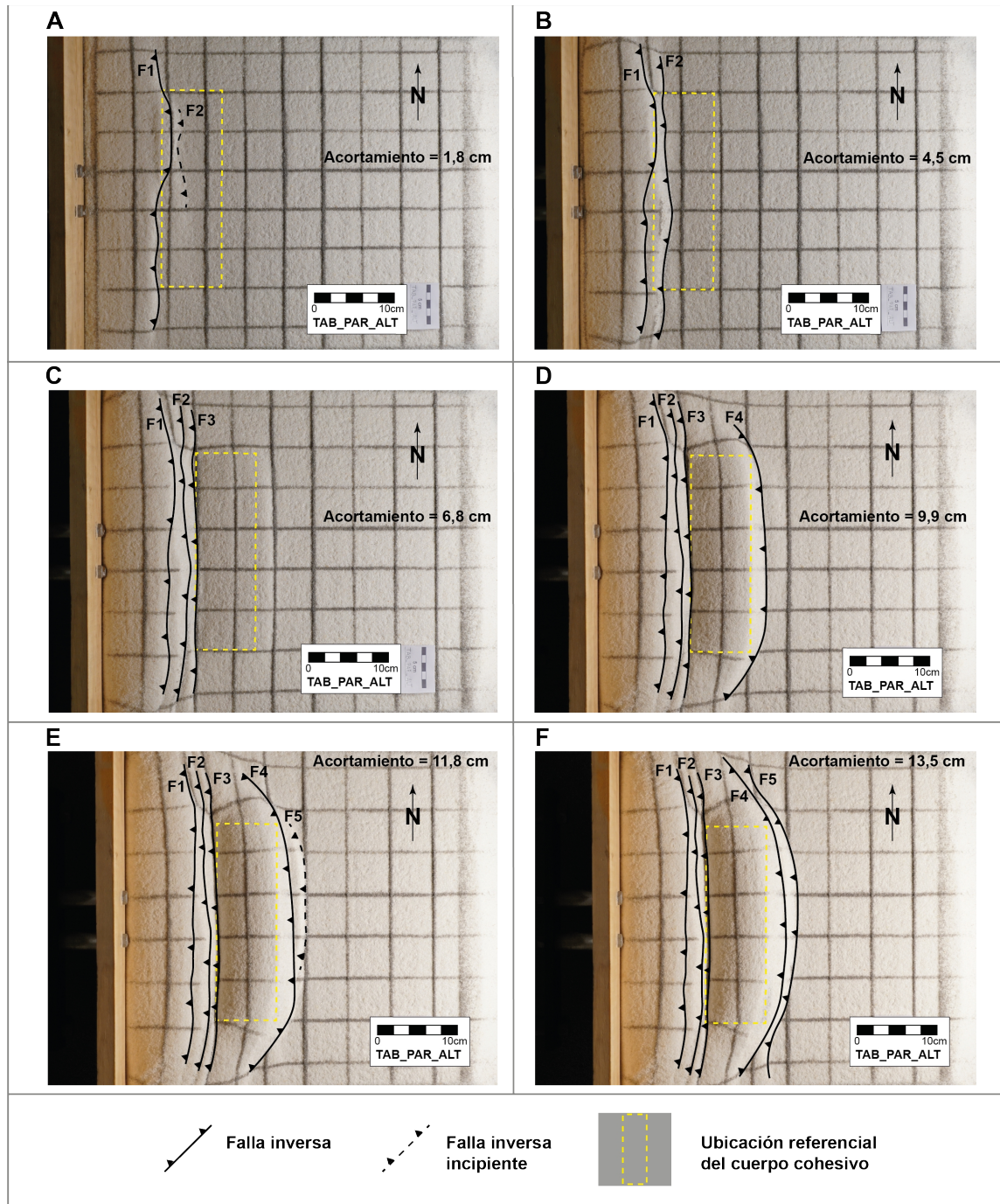


Fig. 16: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_PAR_ALT según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.

4.4.2. Estado final (vista de perfil)

El estado final del experimento se puede visualizar en la imagen de la figura 16F, como también en la de la figura 17H donde se incluyen las trazas de los cortes efectuados sobre el resultado final de la experiencia, los cuales se muestran en el resto de la figura 17 (Fig. 17A-G). Los rasgos estructurales del experimento corresponden a 5 fallas inversas divididas en dos secuencias, por un lado las que se generan al W del cuerpo (F1, F2 y F3), y por el otro las que aparecen al E del mismo (F4 y F5).

Las tres primeras fallas (F1, F2 y F3) presentan un rumbo aproximado N-S y mantienen relativamente la misma separación entre ellas a lo largo de sus trazas (Fig. 16F y 17H). Todas estas nacen en profundidad, al W del cuerpo cohesivo y conforman una primera cuña de acreción que alcanza los 7,1 cm de altura máxima. Esta cuña se cabalga a lo largo del plano de F3, por encima de la capa superficial que cubre al cuerpo cohesivo, dejando al cuerpo intacto sin sufrir deformación producto del desplazamiento de las fallas que integran dicha cuña (Fig. 17B y F). En presencia del cuerpo, las fallas de esta primera cuña, tienden a disminuir el manteo en superficie (Fig. 17B-F), a diferencia de la situación de los extremos, donde las inclinaciones con que afloran son generalmente mayores (Fig. 17A y G).

La secuencia de fallas desarrollada en el sector oriental del modelo, corresponde a la segunda cuña de acreción con una altura máxima de 6,8 cm siendo conformada por F4 y F5. Este par de fallas se generan en el lado W del cuerpo y adoptan un rumbo similar entre ellas, el cual muestra un largo arco de extremo a extremo con sus lados convexos enfrentando el E y con un espaciamiento mínimo entre ellas, aumentando levemente en la parte centro norte del modelo (Figs. 16F y 17H). Estas fallas no cortan en profundidad al cuerpo cohesivo, sin embargo, este es desplazado hacia el W siendo cabalgando por encima de las capas del paquete granular a lo largo del plano de F4. En relación a lo anterior, el cuerpo se muestra levemente inclinado hacia el W, pero sin evidenciar deformación interna producto del movimiento del par de fallas. En los extremos, estas fallas son relativamente rectas en perfil (Fig.

17A y G), a diferencia de los sectores en presencia del cuerpo, donde se hace evidente algún grado de curvatura. Este efecto es notable en F4, la cual nace con bajo manteo en el sector en que el cuerpo se desplaza sobre esta, para aumentar la inclinación bruscamente en el límite oriental del cuerpo cohesivo (Fig. 17B-F). Al igual que en las fallas de la cuña anterior, los manteo en superficie son mayores en los extremos N-S del modelos (Fig. 17A y G), que en los sectores con presencia del cuerpo cohesivo (Fig. 17 B-F).

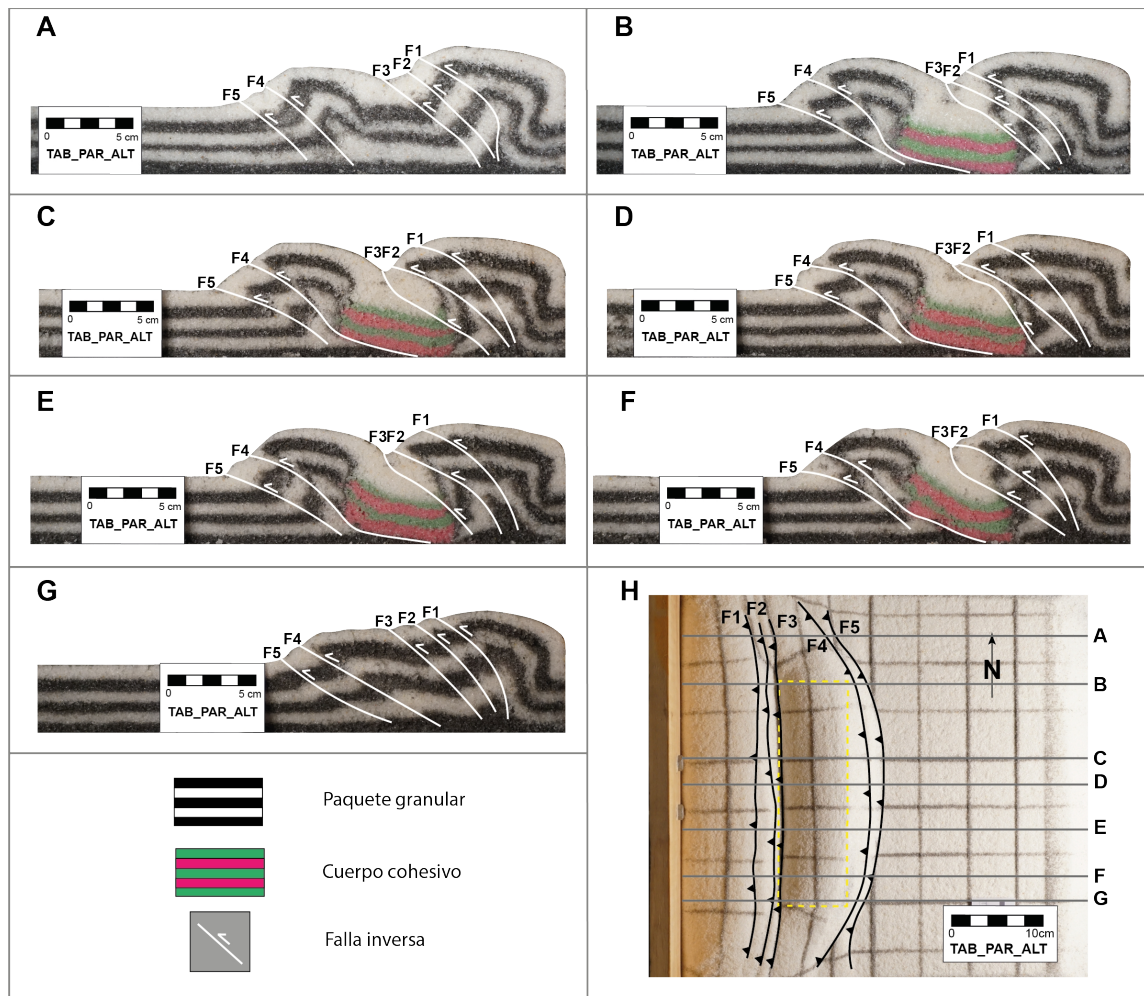


Fig. 17: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_PAR_ALT. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 16. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.

4.5. Modelo TAB_OBL_BAJ

4.5.1. Evolución superficial (vista en planta)

Luego de iniciada la experiencia, el primer indicio de deformación en superficie sucede a los 1,8 cm de acortamiento y corresponde a la formación de una primera falla inversa (F1) de rumbo aproximado N-S, pero con una leve variación de este en el sector centro norte (Fig. 18A). Esto último, hace que exista una diferencia en la ubicación de F1 respecto al muro móvil, distancia que alcanza los 9 y 7,8 cm, en las zonas centro norte y centro sur, respectivamente. La traza de F1 se posiciona por sobre la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en su extremo S, cortando la esquina interior del cuerpo superficialmente.

Una segunda falla inversa (F2) se muestra completamente desarrollada a los 3,6 cm de acortamiento (Fig. 18B). F2 muestra un comportamiento en el rumbo similar al de F1, también aproximadamente N-S con una leve variación en el sector centro norte y cortando en superficie la esquina de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo. La separación entre F1 y F2 es de 2 cm en los extremos y 1,3 cm aproximadamente en la zona central de las trazas.

A los 6,3 cm de acortamiento se desarrolla una tercera falla inversa (F3) al E de las dos anteriores (Fig. 18C). En los extremos, el rumbo de F3 es aproximado N-S, similar al de las anteriores, pero, en la zona central donde corta a la ubicación referencial del cuerpo cohesivo se vuelve curvilíneo, adoptando una forma general cóncava enfrentando al E del modelo.

Después de 9,9 cm de acortamiento se genera una cuarta falla inversa (F4) con comportamiento equivalente a F3 en el sentido en que su rumbo es aproximado N-S en los extremos pero presenta una curva cóncava hacia el E en el sector en que corta superficialmente la ubicación referencial del cuerpo cohesivo (Fig. 18D). F4 se sitúa al E de F3 con un espaciamiento en los

extremos de la traza similar al que esta última guarda con F2, diferente al sector central donde las trazas curvas exhiben una variación entre 1 y 4 cm de distancia.

Cerca del final de la experiencia, a los 11,7 cm de acortamiento, surge la generación de una quinta falla inversa (F5) de larga traza en el vértice oriental de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, en conjunto con el incipiente desarrollo de un retrocorrimiento (F6) en el sector centro norte del modelo (Fig. 18E). F5 se sitúa al E de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo sin cortarlo en superficie y su rumbo se adapta a la disposición del cuerpo desde su vértice oriental. En la zona centro norte, su traza hace una curva convexa enfrentando el E, y desde el centro hacia el S, su rumbo gira en sentido SW aproximadamente. En este último tramo, es donde se acerca más a F4 alcanzando una distancia de 4 cm de separación. La distancia entre F4 y F5 es máxima en el centro de las trazas con 14 cm de espaciamiento. Por otro lado, el retrocorrimiento F6 es la última estructura generada en la experiencia, con una traza corta de 7 cm, de rumbo convexo hacia el E y ubicada a 3 cm al oriente de F4 cortando el borde interno de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en su superficie.

Finalmente, a los 13,5 cm de acortamiento logran desarrollarse mayormente este par de estructuras generadas en la instancia anterior (Fig. 18F). F5 alcanza mayor alzamiento pero manteniendo su traza, y F6 expande su traza a aproximadamente 10 cm y se acerca un par de centímetro a F4 a medida que avanzó la deformación.

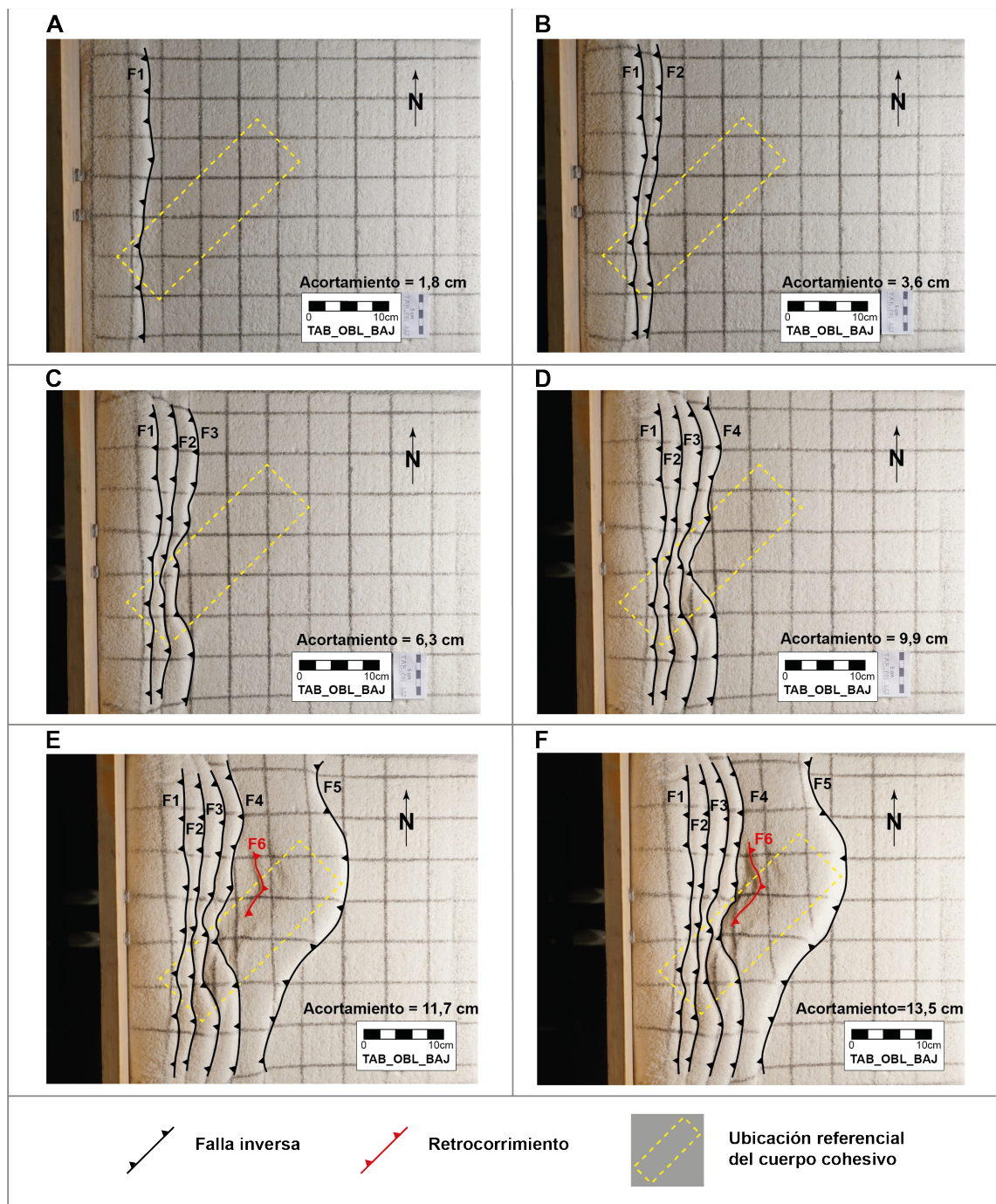


Fig. 18: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_OBL_BAJ según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.

4.5.2. Estado final (vista de perfil)

El resultado final de la experiencia se muestra en el figura 18F, la cual es replicada en la figura 19H incluyendo las trazas de los perfiles realizados sobre el estado final del experimento y presentados en el resto de las imágenes de dicha figura (Fig. 19 A-G). A modo de síntesis, los principales rasgos estructurales de la experiencia corresponden a cinco fallas inversas en secuencia (F1, F2, F3, F4 y F5) y un retrocorrimiento (F6). Estas se pueden dividir entre las que se generan al W del cuerpo cohesivo entre las cuales se encuentran F1, F2, F3 y F4, y las que se generan en el lado contrario que serían F5 y F6 (Fig. 19C-F).

Las cuatro fallas que se generan al W del cuerpo cohesivo, presentan un comportamiento similar tanto superficialmente como en profundidad y toman parte en el alzamiento de una primera cuña de acreción de 7,5 cm de altura máxima. Sus rumbos son aproximadamente N-S pero curvos en el sector en que cortan al cuerpo cohesivo (Figs. 18Fy 19H). De N a S el espaciamiento entre estas fallas se hace cada vez mayor, así mismo, los manteos son cada vez mas empinados en la misma dirección (Fig. 19A-G). F2, F3 y F4 cortan al cuerpo cohesivo en profundidad desplazándolo hacia el E a lo largo de sus planos de falla y colocando el material del cuerpo por sobre la capa superficial que lo cubre como también de las capas que conforman el paquete granular. Estas fallas presentan trazas relativamente rectas en profundidad, a excepción de F1 que es curva cóncava hacia el E en la mayoría de los cortes, fenómeno que va acompañado por el nacimiento de F2 y F3 cercanas a esta curva, casi desde el mismo punto (Fig. 19A-F). La traza en perfil de F4 nace levemente desplazada de las anteriores y en algunos sectores cruza el ancho completo del cuerpo cohesivo para aflorar en su lado exterior (Fig.19E) y en otros cabalga a la primera cuña por sobre el cuerpo cohesivo a lo largo de su plano de falla (Fig. 19D).

Las dos últimas fallas generadas en la experiencia (F5 y F6), a pesar de su naturaleza diferente, tienen características que las relacionan. Estas dos nacen al oriente del cuerpo cohesivo y forman parte del alzamiento de una

segunda cuña de acreción de 5,3 cm de altura máxima (Fig. 19A-D). F5 es la estructura que se encuentra desplazada más al E dentro del modelo y conforma el límite inferior de esta segunda cuña. Presenta un manteo aproximadamente constante a lo largo de su rumbo, con una traza relativamente recta de perfil que no tiene contacto directo con el material que compone al cuerpo cohesivo (Fig. 19C-F). Por otro lado, F6 nace desde el mismo punto que F5 pero su traza en perfil se extiende hacia el lado opuesto, en dirección W, aflorando cerca de F4 (Fig. 19B-D). En el sector central, alcanza a cortar la esquina externa del cuerpo cohesivo, desplazándola hacia el W a lo largo de su plano y por encima de la capa superficial que cubre al cuerpo (Fig.19D). En la zona centro norte, F6 cabalga por sobre el cuerpo cohesivo, superponiendo material del paquete granular encima de este, generando una especie de valle en conjunto con el material desplazado por F4 en el límite inferior de la primera cuña de acreción (Fig. 19C). Por último, en el sector más septentrional de la traza de F6, se observa un mínimo desplazamiento de material de las capas que conforman el paquete granular pero sin evidenciar la presencia del cuerpo cohesivo en la vista de perfil (Fig. 19B).

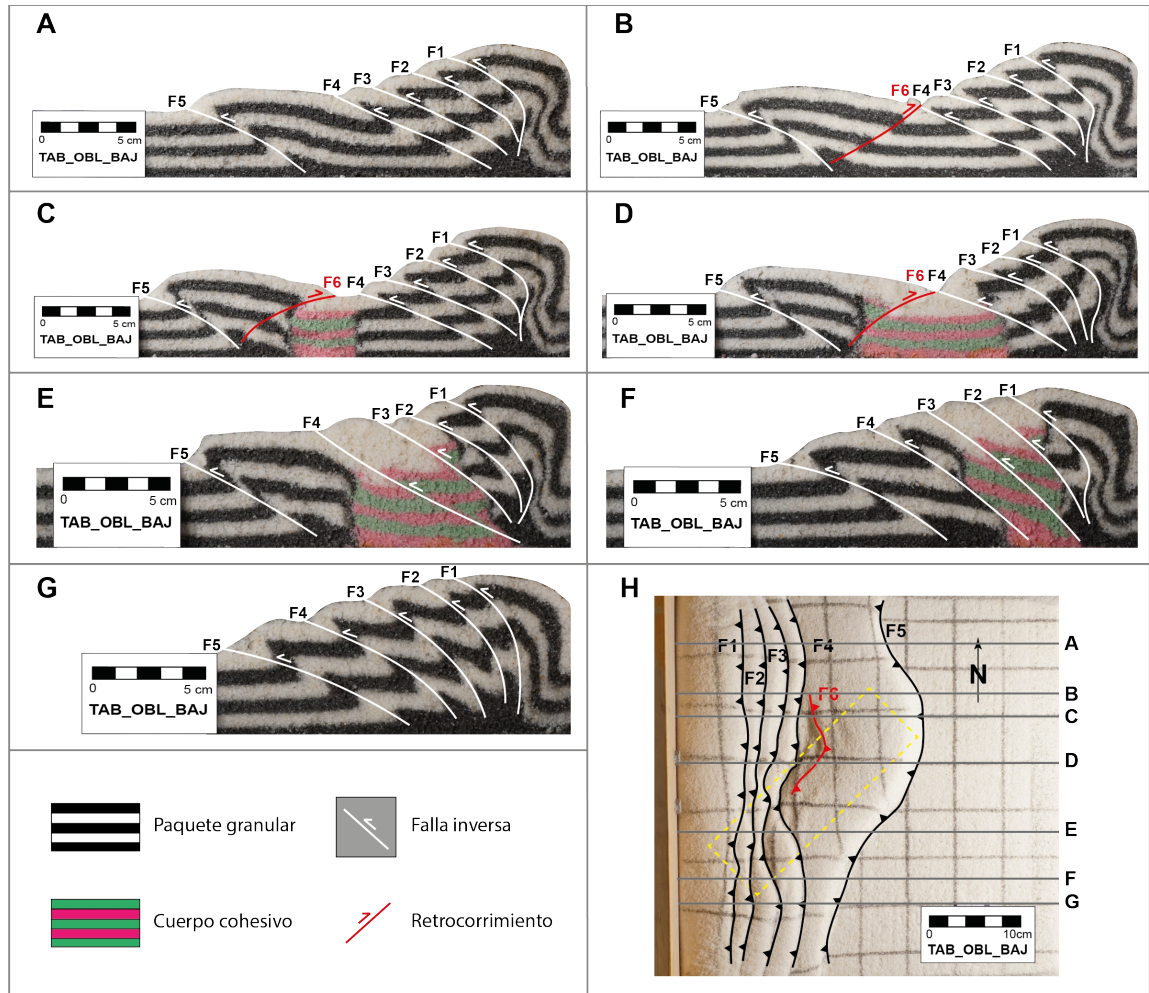


Fig. 19: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_OBL_BAJ. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 18. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.

4.6. Modelo TAB_OBL_ALT

4.6.1. Evolución superficial (vista en planta)

Posterior al inicio de la experiencia, la primera evidencia de deformación en superficie se muestra a los 1,8 cm de acortamiento con el desarrollo de una primera falla inversa (F1) de rumbo aproximado N-S (Fig. 20A). Este último sufre una leve variación en el sector S de su traza,

esquivando con una curva ligeramente cóncava enfrentando el E en la zona del vértice interno de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, sin cortar dicha ubicación. F1 se encuentra a 9 cm promedio al E del muro móvil, pero frente al sector del vértice solo alcanza los 7 cm de separación con el muro.

A los 4,5 cm de acortamiento, se genera una segunda falla inversa (F2) al E de F1, como también, entremedio de estas dos, se aprecia el desarrollo de una ramificación de F1 en el centro del modelo (Fig. 20B). El rumbo de F2 es aproximadamente N-S, pero al igual que F1, se curva en el sector del vértice interno de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo dibujando un arco cóncavo enfrentado al E, esta vez emplazado encima de dicho vértice. La separación con F1 es de 2,5 cm promedio, a excepción de la zona del vértice donde la distancia que las separa llega a ser menor que 1 cm.

Una tercera falla inversa (F3) se desarrolla a los 7,2 cm de acortamiento de rumbo aproximado N-S (Fig. 20C). Al igual que las dos fallas anteriores, el rumbo de F3 también se curva en el sector de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, emplazándose por encima de su esquina, llegando cerca del vértice exterior de la geometría referencial del cuerpo. Esta curva es compleja pero con una forma generalizada cóncava enfrentada al E. F3 se encuentra a 2,5 cm promedio al E de F2, pero en el sector curvo, la ubicación varía desde unos pocos milímetro hasta 4 centímetros de distancia. Otro acontecimiento de este estadio, corresponde a la incipiente aparición oriental de una cuarta falla inversa (F4) subparalela a la geometría referencial del cuerpo cohesivo.

Entre los 9 y 10,2 cm, el desarrollo de F4 logra una extensión completa, con una larga traza que se adapta a la disposición oblicua al E del borde oriental externo de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo, pero sin cortarlo superficialmente (Fig. 20D y E). Su rumbo es aproximado NE desde el extremo S hasta el vértice externo norte de la geometría del cuerpo cohesivo, donde adopta una curva convexa enfrentando el E, para girar en sentido aproximado NW hacia el extremo N del modelo. En el extremo S, F4 nace a menos de 1 cm de la traza de F3, sin embargo, a medida que se avanza hacia

el N, la separación entre estas dos se hace cada vez mayor. Esta distancia alcanza su punto máximo en el sector centro norte con 14 cm de espaciamiento entre el par de fallas. Además, dentro de este intervalo de acortamiento, se desarrolla un retrocorrimiento (F5) en el sector central del modelo, entremedio de F3 y F4. Con una traza relativamente corta de 12 cm y un rumbo generalizado NE con una curva cóncava y convexa enfrentando el E, en sus segmentos N y S, respectivamente. F5 se ubica a 3 cm promedio al E de F3, emplazada por encima de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo en su borde interno.

La experiencia finaliza a los 13,5 cm de acortamiento, con el desarrollo de una sexta falla (F6) al E de F4 en el sector del vértice externo de la ubicación referencial del cuerpo cohesivo (Fig. 20F). Esta última falla, se extiende desde el centro del modelo hacia el N, con un rumbo similar a F4 y a 1 cm promedio de distancia de esta. Otra ocurrencia de este estadio es el desarrollo incipiente de una ramificación de F4 en el extremo S de su traza, que mantiene un rumbo aproximado N-S. Por último, se observa una disminución de la distancia que separa a F3 y F5 en el centro de modelo, alcanzando los 2 cm promedio de espaciamiento entre estas.

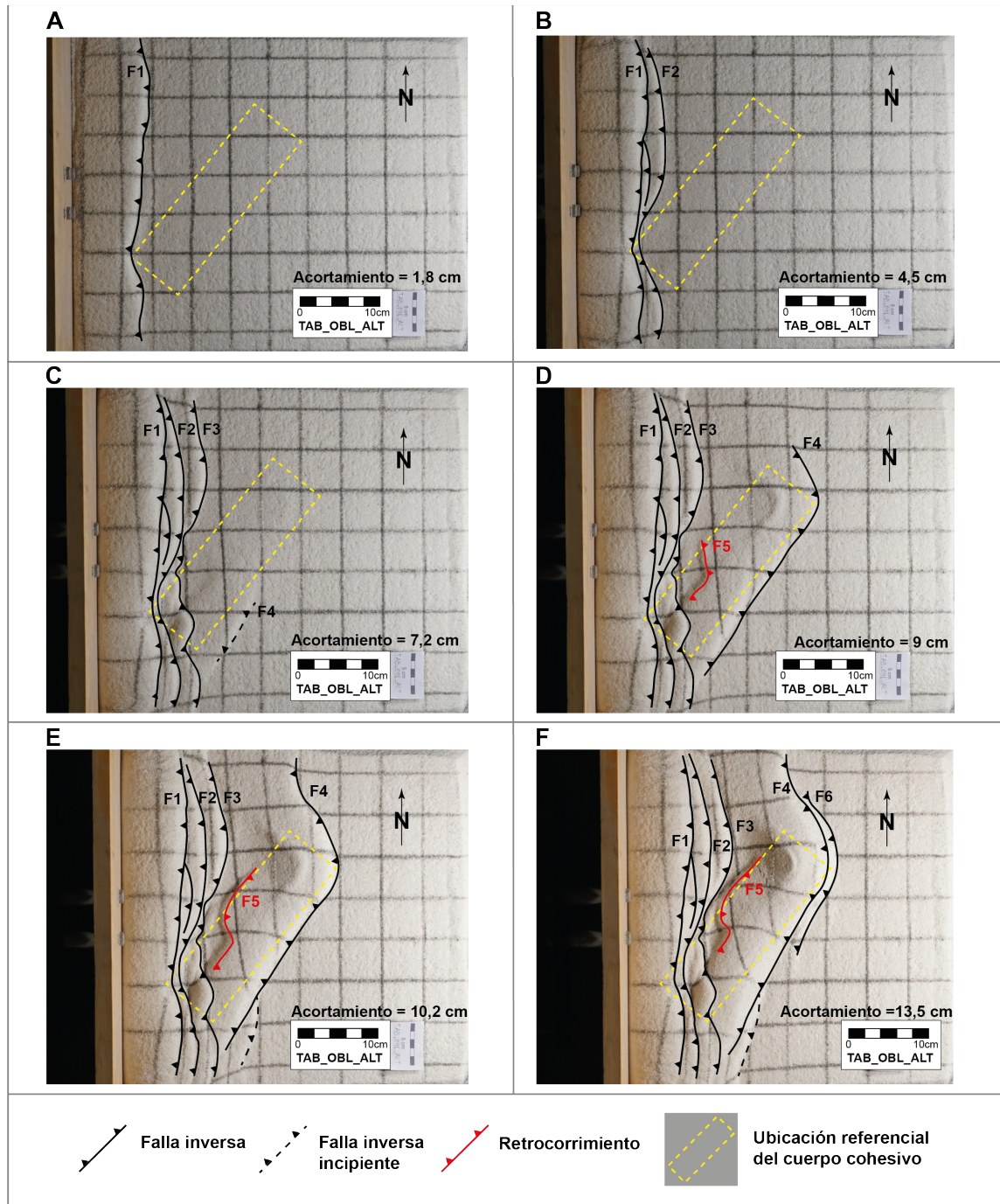


Fig. 20: Vista en planta de las principales ocurrencias estructurales en la evolución superficial del modelo TAB_OBL_ALT según cantidad de acortamiento (ver descripción en el texto). Se señala la posición referencial del cuerpo cohesivo y se enumeran las estructuras en función de su orden de generación. F) Estado final de la experiencia.

4.6.2. Estado final (vista de perfil)

El estado final del experimento se muestra en la imagen de la figura 20F, la cual es repetida en la figura 21H incluyendo las trazas de los cortes efectuados sobre el resultado de la modelación y presentados en el resto de la figura (Fig. 21A-G). Los principales rasgos estructurales de la experiencia pueden ser resumidos como cinco fallas inversas divididas en dos secuencias y un retrocorrimiento ubicado entremedio de estas secuencias.

La primera secuencia es conformada por las tres primera fallas (F1, F2 y F3), todas generadas en profundidad al W del cuerpo cohesivo siendo participe en el alzamiento de una primera cuña de acreción de 7,8 cm de altura máxima (Fig. 21A-E). Las trazas en superficie de estas fallas presentan un rumbo general relativamente similar, aproximadamente N-S, que sufre variación en el sector S, al enfrentarse con el vértice interno de la geometría del cuerpo cohesivo (Fig. 20F y 21H). La mayoría de los cortes muestran que estas tres fallas nacen en profundidad desde aproximadamente el mismo punto (Fig. 21A-F), a excepción del sector extremo S, donde F3 parece mantener cierto desplazamiento hacia el E respecto al par de fallas anteriores (Fig. 21G). Así mismo, es en el sector S donde se muestran manteos más empinados respecto al sector N (Fig. 21A-G). En la zona donde las fallas se emplazan por sobre el cuerpo cohesivo en superficie, estas son capas de cortarlo en profundidad, es el caso de F2 y F3, que logran desplazar al cuerpo cohesivo hacia el E a lo largo de sus planos de falla, superponiendo el material del cuerpo por encima, tanto de la capa superficial que lo cubre, como también de las capas que conforman el paquete granular (Fig. 21E y F). En los sectores donde el cuerpo cohesivo se encuentra al E de la traza del trío de fallas, estas exhiben un cabalgamiento por sobre el cuerpo cohesivo, a través del plano de falla de F3 (Fig. 21C y D).

La segunda secuencia está integrada por F4 y F6, las cuales toman parte en el alzamiento de una segunda cuña de acreción de 6,1 cm de altura máxima y ubicada al oriente del cuerpo cohesivo (Fig. 21A-E). Las trazas superficiales de este par de fallas son similares, siguiendo los lados externos de

la geometría del cuerpo cohesivo, con rumbos aproximados NE y NW, al S y N del vértice externo de la geometría del cuerpo, respectivamente (Figs. 20F y 21H). En profundidad, el par de fallas nacen al E del cuerpo cohesivo, desde un mismo plano que se bifurca cerca de la superficie para aflorar en la zona más oriental del modelo. La segunda cuña aparece incluso en el sector más septentrional, donde no hay presencia del cuerpo cohesivo en superficie (Fig. 21A y B), sin embargo, en las zonas donde el cuerpo se hace presente, este se cabalga a lo largo del plano de F4 hacia el E por encima de las capas que conforman el paquete granular (Fig. 21C-F). Esto último hace que el cuerpo se incline parcialmente al desplazarse a través de dicho plano (Fig. 21C y F).

El último atributo estructural de la experiencia, corresponde a un retrocorrimiento (F5), ubicado entremedio de F3 y F4 en la zona central del modelo. F5 nace en profundidad, en el mismo sector que F4 (Fig. 21D y E), pero su traza se extiende hacia el lado contrario, en dirección W, aflorando en las cercanías de F3 (Fig. 21D). Este retrocorrimiento corta al cuerpo cohesivo en profundidad, desplazándolo a lo largo de su plano hacia el W, provocando el cabalgamiento de este por encima de la capa superficial que lo cubre (Fig. 21D). Incluso en el sector S, donde no aflora F5, se evidencia en profundidad un leve desplazamiento de las capas que integran el cuerpo cohesivo producto de dicho retrocorrimiento (Fig. 21H).

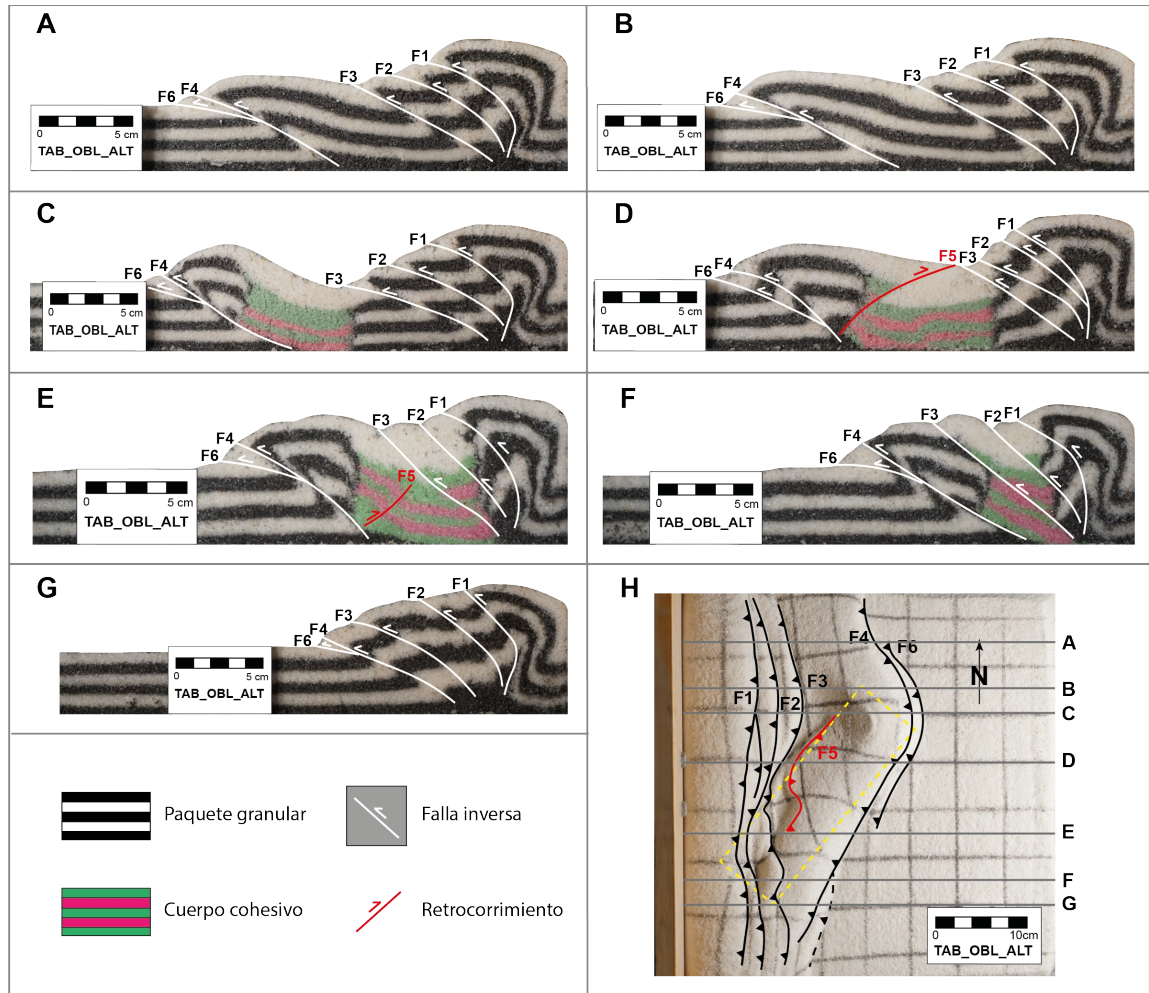


Fig. 21: Interpretación de las secciones paralelas a la dirección de compresión (W-E) correspondientes al estado final del modelo TAB_OBL_ALT. Los perfiles tienen orientación E-W. Se respeta la numeración utilizada en la figura 20. H) Estado final del modelo, incluye trazas de las secciones interpretadas en el resto de la figura.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS

En este capítulo, se analizan los principales resultados extraídos desde las experiencias de laboratorio, en relación a tres factores centrales: cohesión, geometría y disposición del cuerpo cohesivo. Según la elección de los modelos a comparar, los seis experimentos ejecutados, permiten aislar estos factores para conocer el rol que desempeñan en la configuración final de las experiencias. En la tabla 4, se resumen los principales resultados expuestos en el capítulo anterior, a través de la cual se realizará el análisis comparativo de la modelación.

Tabla 4: Tabla resumen de los resultados de los modelos presentados en el capítulo 4. La división “paralelo” u “oblicuo”, en la geometría de prisma tabular del cuerpo, corresponde a su disposición en relación al muro móvil. El campo “rumbo” corresponde a una aproximación de lo que se manifiesta en los modelos. “Alcance E-W” corresponde a la distancia, en centímetros, medida desde el muro móvil hasta la evidencia de deformación más oriental del estado final de las experiencias.

Geometría Cuerpo		Cilíndrica		Prisma Tabular			
				Paralelo		Oblicuo	
Cohesión cuerpo		Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta
Código experimento		CIL_BAJ_01	CIL_ALT_02	TAB_PA R_BAJ	TAB_PA R_ALT	TAB_OB L_BAJ	TAB_OB L_ALT
Fallas en secuencia	Cantidad	5	5	4	5	5	5
	Aparición (cm de acortamiento)	F1(1.8), F2(3.2), F3(5.4), F4(9.4) y F5(13.5)	F1(1.8), F2(3.6), F3(5.8), F4(9.5) y F5(13.5)	F1(1.8), F2(3.2), F3(8.1) y F4(12.2)	F1(1.8), F2(4.5), F3(6.8), F4(9.9) y F5(13.5)	F1(1.8), F2(3.6), F3(6.3), F4(9.9) y F5(11.7)	F1(1.8), F2(4.5), F3(7.2), F4(9) y F6(13.5)
	Cortan cuerpo	2	-	1	-	3	2
	Rumbo	N-S	3	2	3	4	3
		Convexo	2	2	2	1	2
1ra Cuña	Altura (cm)	9,1	8,6	8,8	7,1	7,9	7,8
	Fallas	3	3	3	3	4	3
2da Cuña	Altura (cm)	6,1	6,9	5,9	6,8	5,3	6,1
	Fallas	2	2	1	2	1	2

Retrocorrimiento	-	-	-	-	1	1
Alcance E-W (cm)	17,9	20,5	24,2	22	26,4	25,8

5.1. Características generales

Al analizar la síntesis de resultados en la tabla 4, es posible observar, que la cantidad de fallas en secuencia generadas es la misma (5) para el desarrollo de las experiencias, con excepción del experimento TAB_PAR_BAJ en el cual desciende en uno la cantidad de fallas inversas desarrolladas (4). Esta diferencia puntual en el desarrollo de la experiencia puede ser explicada analizando la temporalidad con la que afloran las fallas en el modelo. Según esto, llama la atención que entre el desarrollo de F2 y F3, en dicha experiencia, hay una diferencia de 4,9 cm de acortamiento, la cual es mucho mayor que en el resto de los experimentos (Fig. 22). Los 4,9 cm de acortamiento corresponden al 36,3% del acortamiento total de las experiencias, y por tanto, el desarrollo de F3 se lleva más de un tercio de la deformación impuesta al sistema, lo que solo permite la generación de una falla más (F4) hasta que culmina el acortamiento a los 13,5 cm.

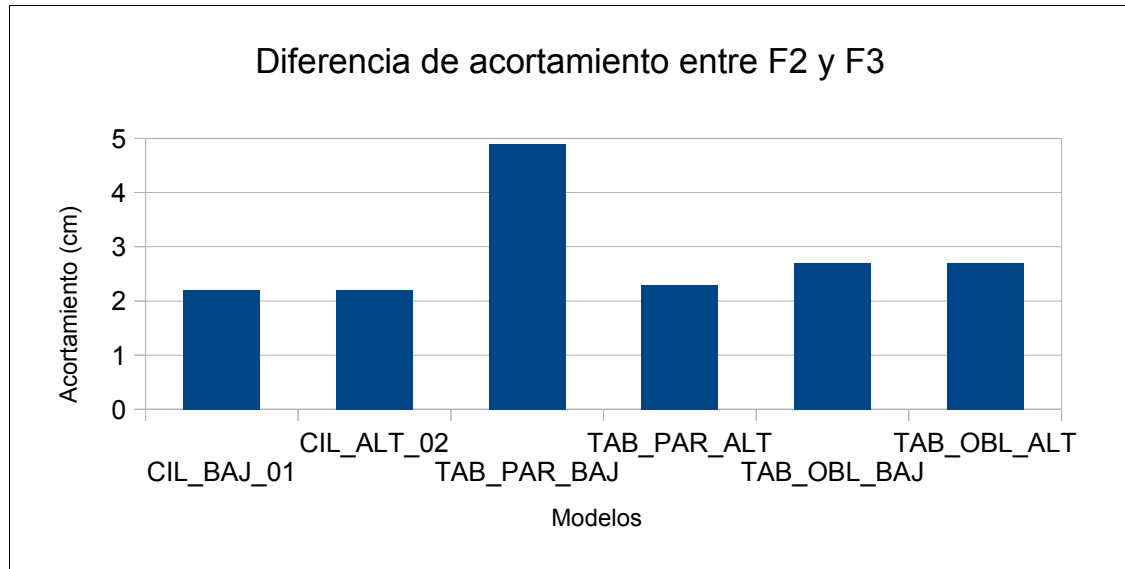


Fig. 22: Diferencia de acortamiento entre el desarrollo de F2 y F3 para cada modelo.

Una característica común de la totalidad de las experiencias, corresponde a la generación de dos cuñas de acreción, una anterior y otra posterior al cuerpo cohesivo, al W y E de este, respectivamente. La primera cuña (al W del cuerpo cohesivo) se forma al frente del muro móvil como una serie de fallas imbricadas tipo *piggyback*, similar a lo que se describe en varios estudios previos (e.g. Mulugueta y Koyi, 1987 y 1992; Huiqi *et al.*, 1992, Gomes, 2013; entre otros). Generalmente se da que las fallas que integran la primera cuña, nazcan en profundidad desde aproximadamente el mismo punto, para separarse en su camino hacia la superficie (Figs. 11, 13, 15, 17, 19 y 21). La altura máxima de la primera cuña varía entre 9,1 y 7,1 cm, variación que depende tanto de la configuración geométrica, como mecánica del cuerpo cohesivo, y en su mayoría está conformada por las tres primeras fallas generadas durante la evolución de las experiencias.

La segunda cuña de acreción aparece, en la totalidad de las experiencias, desplazada de la primera secuencia de estructuras hacia el sector E, distal a la zona de empuje. Su formación es efecto de la presencia del cuerpo cohesivo, incluso en las experiencias con proporción baja de gelatina y por tanto menor cohesión del material del cuerpo. El alzamiento de esta segunda

cuña ocurre en el momento en que la deformación alcanza el sector de la ubicación del cuerpo cohesivo, donde las estructuras pueden cortar o no al cuerpo, dependiendo del caso; pero en la totalidad de las experiencias, la siguiente falla se va a generar desplazada de las estructuras anteriores y con un rumbo que se adapta a la geometría del borde oriental de dicho cuerpo (Figs. 11, 13, 15, 17, 19 y 21). La altura máxima de la segunda cuña varía entre 5,3 y 6,9 cm, incluso llegando a diferencias de altura de 3 cm con la primera cuña, como ocurre en el modelo TAB_PAR_ALT (Tabla 4).

5.2. Rol de los factores

Por medio de la comparación cruzada de las experiencias, se analizará el rol que juegan los factores geométricos y mecánicos del cuerpo cohesivo, en la generación y distribución de estructuras durante la deformación.

5.2.1. Cohesión del cuerpo

Son tres las comparaciones con las que se puede evidenciar el control ejercido por la cohesión en el desarrollo de las experiencias; estas son precisamente, cada par de experimentos que presentan la misma geometría y disposición del cuerpo, pero con distinta cohesión del material que lo compone. Los pares comparables son: CIL_BAJ_01 con CIL_ALT_02, TAB_PAR_BAJ con TAB_PAR_ALT y TAB_OBL_BAJ con TAB_OBL_ALT.

Existen diferencias que se repiten sistemáticamente en cada par conjugado de experiencias en que el factor variable es la cohesión. Una de estas diferencias, corresponde a la cantidad de estructuras que cortan el cuerpo cohesivo. En el experimento con el cuerpo cilíndrico, las fallas que cortan al cuerpo son 2 y 0, en el de baja y alta cohesión, respectivamente. Así mismo, en la experiencia del cuerpo tabular paralelo, la cantidad de fallas inversas es de 1

y 0, en el de baja y alta cohesión, respectivamente. Tendencia que finalmente se repite, en los modelos que incluyen un cuerpo tabular oblicuo, donde las estructuras inversas que corta el cuerpo son 3 y 2, en el de baja y alta cohesión, respectivamente (Fig. 23).

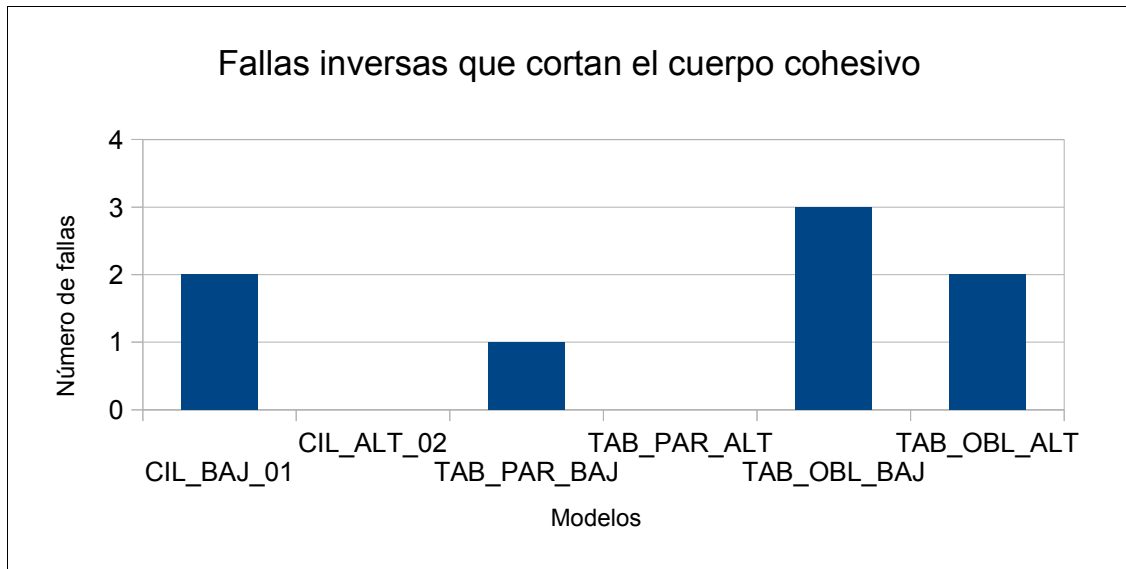


Fig. 23: Cantidad de fallas inversas que cortan el cuerpo cohesivo en cada una de las experiencias. Se observa la tendencia a disminuir esta cantidad en los modelos de cohesión alta, respecto a los de baja.

Este patrón en el comportamiento estructural de las experiencias se explica precisamente porque el material de mayor cohesión es menos susceptible a fracturarse debido al esfuerzo producido por el movimiento del muro móvil y por tanto, la deformación tiende a migrar hacia sectores en presencia de material menos cohesivo, como es el sector justo al oriente del cuerpo integrado por material del paquete granular, que es menos cohesivo y más susceptible a romperse. Este hecho, también explica la tendencia a dividir las series de estructuras entre las que se encuentran antes y delante del cuerpo cohesivo, como también, la del alzamiento de dos cuñas desplazadas unas de otras.

Otra diferencia coincidente en cada par de experiencias con la cohesión como la variable, corresponde a la altura de las cuñas de acreción.

Mientras que las primeras cuñas se alzan a mayor altura en los modelos de baja cohesión en comparación con los de alta, lo opuesto ocurre con las segundas cuñas, donde las de mayor altura aparecen en los modelos de alta cohesión en el material del cuerpo (Fig. 24).

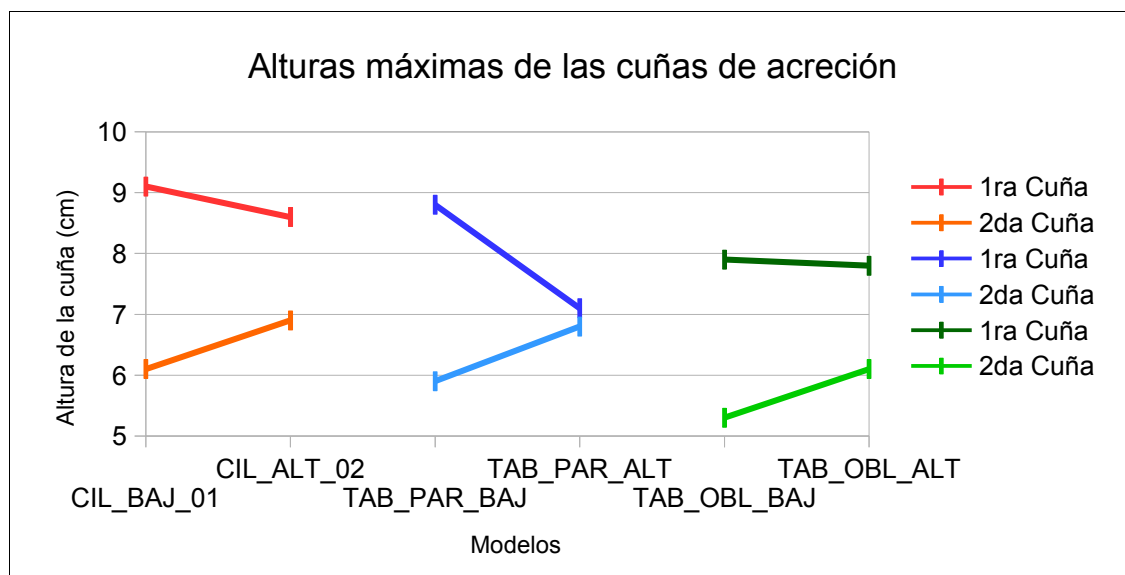


Fig. 24: Alturas máximas de las cuñas de acreción formadas en las experiencias, agrupadas en relación a los pares de experiencias que tienen a la cohesión como variable en cuestión. Se observa la relación inversa que acompaña al aumento de cohesión respecto al crecimiento y decrecimiento de la 1ra cuña y 2da cuña, respectivamente.

Esta relación inversa va acompañada con el punto anterior, pues, las mayores diferencias de alturas en las cuñas se encuentran justamente en el par de modelos en que las fallas cortaron al cuerpo en su versión de baja cohesión, pero no lo hicieron en los de alta: CIL_BAJ_01 vs CIL_ALT_02 y TAB_PAR_BAJ vs TAB_PAR_ALT (Figs. 23 y 24, Tabla 4). Además, en todos los modelos donde la cohesión es alta, el cuerpo cohesivo se desplaza a lo largo del plano de F4, inclinándose al W y aportando al subsecuente alzamiento de la segunda cuña (Figs. 13, 17 y 21). Todos los sucesos anteriormente mencionados son consecuencia de la cohesión del cuerpo inserto en el paquete granular. Por una lado, en los modelos de cohesión baja, la progresión de la deformación actúa relativamente normal, y a pesar de que existe un contraste

de competencia entre el cuerpo y su entorno, las estructuras logran cortar el cuerpo y ganar altura en la primera cuña. Para el momento en que se produce la migración de la deformación hacia el oriente y se alza una segunda cuña, la mayor parte del esfuerzo ha sido absorbido por las estructuras anteriores o las trazas de perfil son muy extensas lo que hace que el alzamiento sea menos efectivo. Por el otro lado, en los modelos de cohesión alta, la actividad de las estructuras que integran la primera cuña, rápidamente se encuentran con el material rígido, lo cual hace que la deformación, a través del cabalgamiento del cuerpo por encima de F4, se concentre en el alzamiento de la segunda cuña de manera más efectiva.

5.2.2. Geometría del cuerpo

A través de dos comparaciones de los modelos ejecutados, se puede analizar el rol de la geometría del cuerpo cohesivo en la configuración estructural del sistema compresivo. Estas comparaciones agrupan a las experiencias donde la geometría es la variable y el cuerpo se encuentra en una disposición simétrica con respecto al muro móvil. De esta manera, los dos pares a comparar corresponden a: CIL_BAJ_01 con TAB_PAR_BAJ y CIL_ALT_02 con TAB_PAR_ALT.

El aspecto más notorio acerca de la geometría del cuerpo en las experiencias, corresponde a la tendencia de las fallas de adoptar la geometría de los bordes del cuerpo. En los modelos con el cuerpo cilíndrico, las trazas superficiales presentan curvas onduladas relativamente pequeñas, acordes con la geometría circular del área del cuerpo y la mayoría concentradas en el centro, lugar donde se encuentra el dicho cuerpo (Figs. 11 y 13). En cuanto a los modelos tabulares, ya sea en el de baja o alta cohesión, en general las curvas corresponden a largos arcos que se extienden de extremo a extremo, a excepción de las estructuras ramificadas, que presentan terminaciones más abruptas (Figs. 15 y 17). Esta adopción de la geometría del cuerpo como la

traza de la estructura, es consecuencia del contraste de las propiedades mecánicas entre el cuerpo discordante y su entorno, debido a que existe una interrupción en el patrón normal de deformación al toparse con un material mas competente. Esa interrupción se produce en el borde del cuerpo cohesivo y se traduce en la superficie como trazas que muestran la geometría de dicho borde.

Por otro lado, una diferencia que se repite en el par de comparaciones tiene que ver con las terminaciones externas del cuerpo. Una geometría con vértices o angulosa en sus cantos, provoca mayor propagación de la deformación, por lo cual, se pueden observar indicios de una interrupción del patrón normal de deformación generados por el cuerpo, incluso en los sectores extremos, donde no hay presencia del cuerpo en profundidad (Figs. 15A y G, y 17A y G). El caso contrario, lo exhiben las geometrías sin vértices, como es el caso del cilindro, donde generalmente, el efecto de la deformación producto de la geometría del cuerpo, solo es apreciable en los sectores cercanos a este (Figs. 11A y G, y 13G). Este fenómeno se da debido a que la tendencia general de las fallas es seguir la geometría del cuerpo cohesivo, y por tanto los cantos redondeados y suaves facilitan la homologación de la traza debido a que los esfuerzos se distribuyen de manera relativamente homogénea en los bordes del cuerpo. Por otro lado, el vértice significa una interrupción abrupta en la geometría de la traza, por lo cual, no existe una transición suave hacia el patrón de normal de deformación.

Por último, existe otra diferencia que se replica en los modelos contrastados y corresponde a la distancia máxima del alcance de la deformación. Se puede apreciar que, a pesar de que los cuerpos, tanto cilíndricos como tabulares, disponen su límite externo similarmente a los 20 cm, los cuerpos tabulares siempre alcanzan mayor distancia del alcance de la deformación hacia el oriente del modelo (Fig. 25). Esto último es independiente de la cohesión, debido que al comparar las geometrías con baja o alta cohesión, en todos los casos el alcance mayor es el del cuerpo tabular. Lo cual, se explica debido a que la extensión del cuerpo tabular es mucho mayor que el

cilíndrico, lo que obliga a la deformación a desplazar una alta cantidad de material a medida que progresa, logrando propagarse por distancias más extensas. Esto se suma al hecho de que la disposición del cuerpo tabular es paralela al muro móvil, favoreciendo la continuidad homogénea de la deformación, de manera que logra alcanzar abordar mayor área.

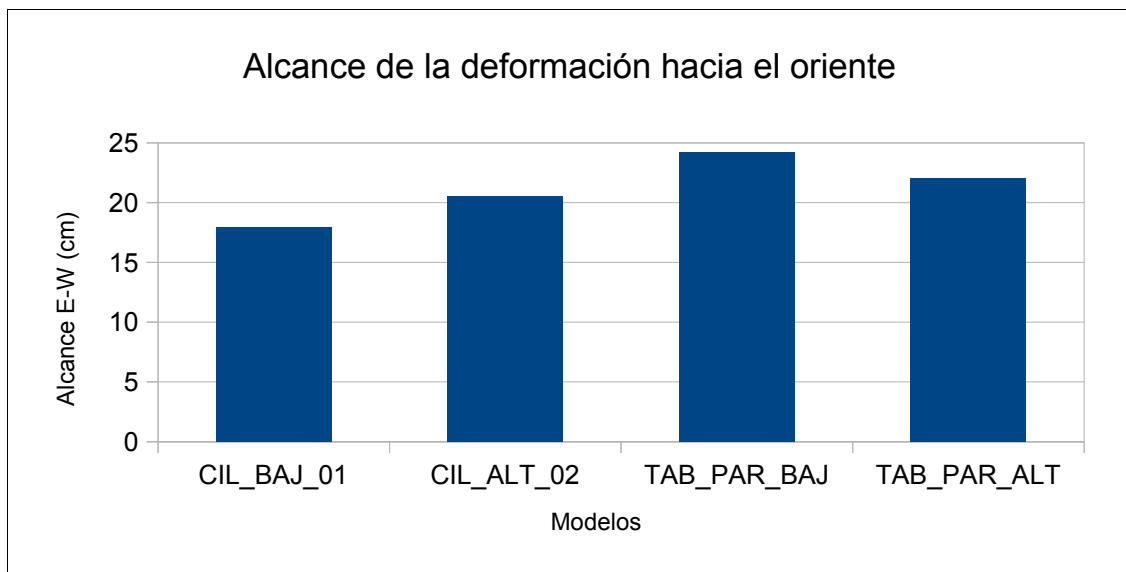


Fig. 25: Distancia de alcance de la deformación desde el muro móvil hacia el oriente para los cuatro modelos comparados según geometría.

5.2.3. Disposición del cuerpo

Finalmente, las comparaciones que permiten evidenciar el control ejercido por la disposición del cuerpo cohesivo son dos. Las cuales corresponden a los experimentos de geometría tabular pero con la disposición del cuerpo como variable. Según esto los modelos a contrastar son: TAB_PAR_BAJ con TAB_OBL_BAJ y TAB_PAR_ALT con TAB_OBL_ALT.

El rasgo más sobresaliente que diferencia estas comparaciones corresponde a la presencia de un retrocorrimiento en la dos experiencias que incluyen el cuerpo oblicuo (Fig. 26). Esta estructura no aparece en ninguna del resto de los experimento, y es independiente de la cohesión debido a que se

desarrolla tanto en el de cohesión baja como alta. La existencia de este retrocorrimiento depende de la oblicuidad del cuerpo cohesivo con respecto al muro móvil, pero lo que son las características de la estructura misma, en este caso, dependen de la cohesión. Para explicar la generación del retrocorrimiento, es preciso imaginarse la misma situación de deformación pero eliminando el material que conforma el paquete granular, con lo cual solo quedaría el cuerpo cohesivo y el muro móvil desplazándose hacia el oriente, con dirección oblicua a dicho cuerpo. El muro móvil al llegar sector S del cuerpo, que es el que se encuentra más cercano lo va a desplazar hacia la misma dirección que el sentido de deformación. Pero por el contrario, el sector norte del cuerpo se queda estable, lo cual genera una rotación anti-horaria del objeto alargado hasta que quedar en posición paralela al muro móvil u ortogonal la dirección del esfuerzo. Sin embargo, como este cuerpo no es completamente rígido, en vez de rotar, se comienza a fallar. Al agregar el paquete granular, y como el cuerpo presenta mayor cohesión, en vez de fracturarse el cuerpo por el medio, es cabalgado desde el borde oriental en sentido contrario a la secuencia de deformación normal (Figs.19B-D y H, y 21D, E y H).

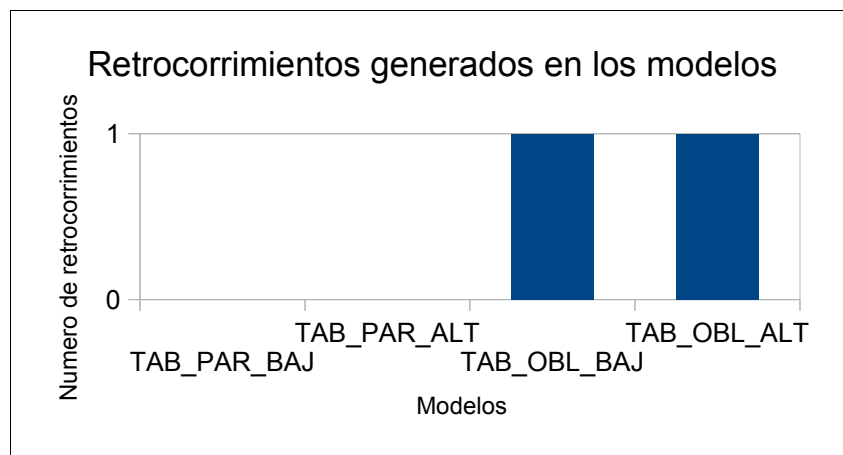


Fig. 26: Cantidad de retrocorrimientos generados en las experiencias, comparación según disposición del cuerpo cohesivo. Se observa que solo se generan ese tipo de estructuras en las experiencias con disposición oblicua del cuerpo respecto al muro móvil.

Otra diferencia que se repite en las comparaciones corresponde a la

cantidad de fallas inversas que cortan al cuerpo en profundidad. Para los modelos con disposición paralela del cuerpo, esta cantidad es de 1 y 0 en los de baja y alta cohesión, respectivamente. La cual aumenta considerablemente para la disposición oblicua del cuerpo con 4 y 3 en los de baja y alto cohesión, respectivamente (Fig. 27). De esto, se deduce que la disposición oblicua del cuerpo cohesivo favorece la deformación interna del cuerpo cohesivo. Esto se explica debido al material cohesivo que la deformación se encuentra mientras se propaga. Mientras mayor material cohesivo se encuentre, las fallas van a ser mas propensas a esquivar el cuerpo y desplazarse a un sector en que el material no oponga tanta resistencia a la deformación (Figs. 15 y 17). En el caso del cuerpo oblicuo, la cantidad de material cohesivo que se enfrenta al esfuerzo va aumentando a medida que progresa la deformación. Cuando la deformación llega al extremo S en su etapa inicial, a poca cantidad de material no opone mayor resistencia a fallarse, en cambio cuando esta progresa hacia el oriente, enfrentándose al material del extremo N, la cantidad de material cohesivo es la suma de todo lo que deformó anteriormente y por tanto la resistencia que opone es mucho mayor. Esta es una de las razones de porqué las fallas que cortan al cuerpo se encuentran en el S y en el norte, el cuerpo permanece relativamente intacto (Figs. 19C-F, y 21C-F).

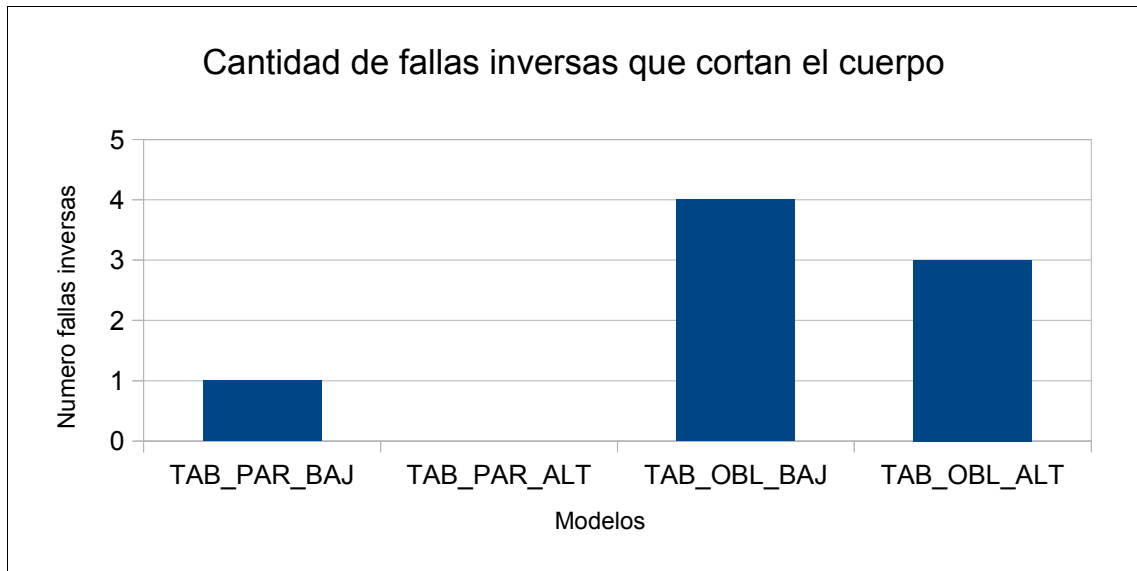


Fig.27: Numero de fallas inversas que cortan el cuerpo cohesivo en profundidad para cada modelo, según comparación respecto a disposición del cuerpo. Se observa la gran cantidad de fallas seccionando el material cohesivo en los modelos de disposición oblicua en comparación con los paralelos.

6. DISCUSIÓN

El tratamiento experimental planteado y ejecutado en este estudio permite comprender el rol que ejerce el contraste de competencias, entre un cuerpo cohesivo y su entorno, en la evolución estructural de un sistema compresivo. Para lograr esto, y en función de aislar los parámetros en estudio, es necesario excluir una infinidad de factores que añaden complejidad a la modelación, pero que sin duda están presentes en los sistemas naturales. En el caso de que se requiera estudiar algún prototipo en particular, sería preciso agregar al sistema los factores que pueden ejercer cierto control estructural sobre el marco en consideración. Adicionalmente, fue muy importante asegurarse que la preparación de cada experiencias se hiciera de la misma manera estandarizada, con la finalidad de obtener resultados coherentes y comparables, que pudieran ser sometidos a interpretación.

Los resultados de los experimentos presentan un sinfín de características que pueden ser analizadas, discutidas e interpretadas, pero en este apartado solo se hará enfoque en los aspectos más importantes y sobresalientes de la modelación. En este sentido se discutirá en primera instancia sobre los rasgos generales de la deformación, luego sobre los factores en estudio y finalmente se compararán los resultados con prototipos naturales.

6.1. Rasgos generales

Los modelos de deformación compresiva ejecutados muestran, a grandes rasgos, resultados similares en la evolución de cada experiencia, sin embargo, al ser sujetos a un análisis detallado estos difieren significativamente unos de otros.

El alzamiento de dos cuñas de acreción, desplazadas una de otra, es un resultado que se repite en los seis experimentos realizados. La primera cuña

siempre se encuentra entre el cuerpo cohesivo y el muro móvil y está compuesta por una serie de fallas imbricadas en estilo piggyback (Mulugeta y Koyi, 1987 y 1992; Huiqi *et al.*, 1992, Gomes, 2013; entre otros). El paquete granular, originalmente horizontal, se deforma internamente alcanzando el ángulo de cuña crítica (Fig. 28). A medida que progresa la deformación, el material acoplado en la parte inferior o pie de la cuña, induce la deformación al interior de esta, estableciendo una serie de paquetes limitados por despegues de fallas que preservan la deformación dentro de la cuña (Davis *et al.*, 1983). Las imbricaciones antiguas rotan hacia atrás, ganando inclinación en su pendiente, tal como ha sido inferido en cordones montañosos y cuñas de acreción (e.g., Karig 1974; Moore y Karing, 1976). A pesar que el avance del muro móvil es constante, los niveles de despegue se propagan de manera episódica durante el progreso de la deformación (Mulugeta y Koyi, 1992).

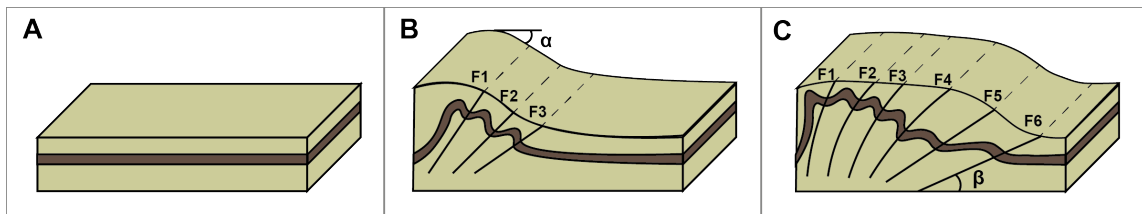


Fig. 28: Esquema conceptual de la evolución interna de una cuña de acreción. A) Paquete granular horizontal, previo al inicio de la deformación. B) Estado intermedio de la deformación, a medida que se alza la cuña y llega a su ángulo crítico, esta se deforma internamente generando una imbricación de fallas en secuencia. C) Estado avanzado de la deformación, se observa la rotación de las imbricaciones antiguas hacia la zona de empuje. α corresponde al ángulo de pendiente del frente de la cuña y β es el manteo de las fallas inversas. β rota hacia atrás empinándose, a medida que progresa la deformación.

Cuando la deformación se propaga hasta el sector donde se encuentra el cuerpo cohesivo, independiente de que fuese cortado o no en profundidad, la deformación tiende a desplazarse hacia el oriente del cuerpo cohesivo, generando una segunda cuña de acreción que se configura de la misma forma que la primera. Según esto, el cuerpo cohesivo actúa como un verdadero muro móvil, transfiriendo hacia adelante la zona activa de acortamiento. En primera instancia, la deformación compresiva es proporcionada por un límite artificial, a

través del desplazamiento constante del muro móvil. Sin embargo, la presencia del cuerpo cohesivo puede significar una adecuada aproximación en la representación de cuñas de acreción naturales, donde los *backstop* presentan diversas geometrías correspondientes a regiones más competentes producto de la litificación o metamorfismo y sosteniendo importantes implicancias en la distribución de zonas sismogénicas (Silver *et al.*, 1985; Byrne y Hibbard, 1987; Byrne *et al.*, 1988, Mulugeta y Koyi, 1992).

Otro resultado que es común para la totalidad de los experimentos realizados, corresponde a la tendencia de las fallas de evitar al cuerpo cohesivo adoptando como sus trazas superficiales la geometría de los bordes de dicho cuerpo. Esta característica es comparable con los resultados de los experimentos elaborados por Marques y Cobbold (2002) donde se investiga el efecto de la topografía en el desarrollo de cinturones montañosos arqueados. En relación a lo anterior, modelos compresivos con topografía inicial de meseta o montañas cónicas, localmente mayores que el entorno, tienden a resistir el acortamiento, tal cual lo predice la teoría de la cuña crítica (Davis *et al.*, 1983). En estos casos las fallas tienden a desarrollarse antes o delante de estas áreas y con trazas arqueadas en vista en planta (Marques y Cobbold, 2002). Esta geometría arqueada corresponde, al igual que en los modelos de este estudio, a la geometría del objeto contrastante inserto en el paquete granular. Según esto, la resistencia que oponen los cuerpos cohesivos en los modelos de este estudio, tienen un efecto semejante a la resistencia que oponen los esfuerzos verticales en los modelos de Marques y Cobbold (2002). Estos autores comparan estos patrones estructurales arqueados con las tres mesetas más grandes de la Tierra (Tibet, Pamirs y el Altiplano de los Andes Centrales) y con el ridge volcánico de Tromen en la Cuenca Neuquina Patagonia norte. Debido a la gran similitud de los modelos de este estudio con los de Marques y Cobbold (2002), más adelante se hará una comparación que incluye uno de estos prototipos naturales, el cual es el Altiplano de los Andes Centrales.

6.2. Rol de los factores: cohesión, geometría y disposición del cuerpo cohesivo

El factor principal que controla la evolución estructural en las experiencias es la cohesión del material que compone al cuerpo. Dependiendo de su magnitud, se va a tener un cuerpo que opone mayor o menor resistencia a la deformación, pero siempre mayor en relación al entorno. En este sentido, la configuración estructural resultante es altamente susceptible a los contrastes de competencia entre los componentes que integran el sistema. Cuando la cohesión del cuerpo es baja, y por tanto, cercana a la del paquete granular, se obtiene una secuencia normal de fallas imbricadas que incluso logran cortar en profundidad a dicho cuerpo. Esto es cercano al caso en que no tenemos contraste de competencia alguno. Sin embargo, la incidencia del cuerpo de relativa baja cohesión se evidencia a través de dos hechos: (1) el patrón adoptado por las trazas superficiales de las estructuras sigue la geometría del cuerpo, incluso en el caso en que la diferencia de competencias es baja, y (2) la generación de una segunda cuña de acreción desplazada de la primera hacia el lado opuesto del cuerpo y con una elevación significativamente menor que la primera cuña. Por el otro lado, cuando la cohesión del cuerpo es alta, y por tanto existe un gran contraste de competencias con el entorno, el patrón normal de fallas se ve interrumpido por la presencia de este objeto como un obstáculo, gatillando la migración de la deformación hacia el lado opuesto, donde eventualmente se alzaría una segunda cuña de acreción. Los patrones que van a permitir dilucidar la presencia de este alto contraste en la cohesión de los elementos que componen un sistema son: (1) una interrupción completa de la secuencia imbricada de fallas, (2) el alzamiento de una segunda cuña de acreción desplazada de la primera y con una elevación cercana a esta y (3) la rotación del cuerpo cohesivo a medida que se cabalga a lo largo de una de las estructuras que conforma a la segunda cuña.

La geometría del cuerpo cohesivo es un factor secundario en estas

experiencias, debido a que la mayoría de las características presentes en la configuración estructural de los modelos pueden ser explicadas desde el factor principal de este estudio, que es la cohesión. Uno de los aspectos importante en los resultados y que ya fue abordado en los primeros párrafos de la discusión, corresponde a la tendencia de las trazas a seguir la geometría del cuerpo, no obstante, esto se hace evidente incluso sin la necesidad de generar modelos con variaciones geométricas. Un resultado que no es necesariamente evidente en esos términos, atañe a las terminaciones geométricas del cuerpo. Debido a la tendencia de las estructuras a seguir la geometría del cuerpo, estas se adaptan con mayor facilidad a los bordes curvos o suaves. Lo contrario ocurre en presencia de vértices o cantos angulosos, donde en ausencia de una transición suave en la deformación, se generan zonas de transferencia o una prolongación de las estructuras hacia los extremos del sistema. En relación a esto, un cuerpo de bordes curvos con transiciones suaves va a permitirle a las estructuras a reanudar el patrón normal de deformación en menor distancia. En cambio los bordes abruptos o angulosos generan una mayor propagación del patrón deformacional inducido por el cuerpo cohesivo. Esto permite evidenciar indicios del contraste de competencias entre un cuerpo y su entorno, en sectores cada vez más alejados del área en que se encuentra dicho contraste.

Otra característica ligada a la geometría del cuerpo cohesivo, compete a la distancia de alcance de la deformación en la dirección de propagación del esfuerzo. Los modelos muestran que un cuerpo tabular logra mayor propagación de la deformación en esta dirección que un cuerpo cilíndrico. Sin embargo, esta comparación es mucho más compleja que esto. El cuerpo cilíndrico en los modelos, a pesar de tener un diámetro mayor que el ancho del cuerpo tabular, tiene menor volumen y por tanto contiene menor masa. El hecho de que posea menor masa hace que la cantidad de material que se opone al esfuerzo sea menor, y por tanto el cuerpo cohesivo genera menos resistencia ante la deformación que la geometría tabular. El efecto de esto, puede ser que la deformación, en el caso del cilindro, se desarrolle más cercana al cuerpo.

Esto parece ser intuitivo, pues si lo llevamos a términos extremos, donde el cuerpo tabular tenga dimensiones mucho menores que el cilíndrico, el resultado final, probablemente muestre un alcance de la deformación ínfimo de la geometría tabular en relación al cuerpo cilíndrico.

Finalmente, algunas características presentes en los modelos, no son evidentes con el análisis de factores ya mencionados (cohesión y geometría del cuerpo), si no que son propias de un último parámetro que corresponde a la disposición del cuerpo en relación a la dirección del esfuerzo o, en su defecto, al muro móvil. El efecto de la relación de la disposición del cuerpo cohesivo, sobre la configuración estructural resultante del sistema compresivo, se analizó a través de los resultados de experiencias de cuerpos alargados, por un lado paralelos al muro móvil u ortogonal a la dirección del esfuerzo, y por el otro lado oblicuo (45°) al muro móvil, como también a la dirección del esfuerzo. Según estos parámetros, el control ejercido por la disposición del cuerpo cohesivo se evidencia en base a dos características que solo son apreciables en las experiencias oblicuas. La primera es la aparición de retrocorrimientos que nacen en profundidad al oriente del cuerpo y que en vista en planta se ubican entremedio de las dos cuñas por sobre la superficie del cuerpo cohesivo. La existencia de retrocorrimientos en modelos físicos de cuñas de acreción no es algo nuevo, Mulguta (1988) da cuenta que cuando la cohesión es un componente importante de resistencia, se generan pilas de retrocorrimientos entre los despegues de fallas inversas. En el caso de los resultados de este estudio, los retrocorrimientos solo están presentes en las experiencias de de disposición oblicua del cuerpo, y posiblemente se formen como consecuencia de la tendencia de los cuerpos oblicuos de lograr la una disposición paralela a la superficie de empuje. Cómo la progresión de la deformación arrastra cada vez más masa, el material de vuelve inestable ante el esfuerzo, fracturándose y generando el retrocorrimiento.

La otra característica asociada a este factor corresponde a la gran cantidad de fallas inversas que cortan el cuerpo oblicuo en relación al paralelo;

lo cual ocurre debido a que el progreso de la deformación se enfrenta al cuerpo cohesivo siempre en volúmenes pequeños, empezando desde el vértice que enfrenta la zona de empuje, y por tanto la resistencia que se opone a la deformación no es suficiente en los sectores del cuerpo que se encuentran más cercanos al muro móvil, según esta oblicuidad. Cada vez, el esfuerzo se encuentra con mayor cantidad de masa, tanto del cuerpo cohesivo como del paquete granular, y probablemente llega un punto en que la resistencia ejercida es muy grande, produciendo la formación del retrocorrimiento y la consecuente migración deformacional hacia el lado oriental del cuerpo.

6.3. Comparación con ejemplos naturales

Las comparaciones con prototipos naturales de este apartado se abordan de manera generalizada y en acuerdo con ciertas características similares a los resultados de la modelación. A pesar de que fue muy importante lograr la representatividad de los modelos con la naturaleza a través de la Teoría del escalamiento, los prototipos sometido a la comparación abordan un gran espectro de escalas, por lo cual, cabe volver a mencionar que no es el objetivo de este trabajo lograr la representatividad de las regiones comparadas, si no, entender cómo se expresa el factor estudiado en distintas configuraciones estructurales del mundo natural.

Una de las comparaciones, como ya fue mencionado, es con el Altiplano de los Andes Centrales, a raíz de las similitudes de los modelos de este estudio con los de Marques y Cobbold (2002). El Altiplano se forma en consecuencia de la subducción Andina y está limitado tanto al W como al E, por cordilleras (Allmendinger *et al.*, 1997). Hacia el S, el Altiplano es limitado abruptamente por la zona de transferencia de Tucumán, área de deformación transpresiva (de Urreiztieta *et al.*, 1996), y hacia el N se curva progresivamente en los Andes Peruanos. Patrones similares a estos se observan en el modelo TAB_PAR_BAJ, en cuanto a la limitación del objeto por *Thrust Belts* al W y E,

respectivamente y zonas de transferencia en los extremos (Fig. 29). Según evidencia paleomagnética, el antearco chileno se habría comportado rígidamente en el Neógeno (Roperch *et al.*, 2000), con lo cual la deformación migró hacia el oriente de manera episódica y aparentemente el Altiplano también habría asumido un comportamiento rígido (Allmendinger *et al.*, 1997; Lamb y Hoke, 1997; Coutand *et al.*, 2001). Marques y Cobbold (2002) sugieren que este comportamiento rígido del Altiplano se debe a su alta topografía. En este trabajo se sugiere que aparte de topografía, puede existir un contraste de competencias entre los materiales que conforman el altiplano en profundidad y su entorno. Según Isacks (1998) el origen del Altiplano es consecuencia de engrosamiento cortical y adición de magma, lo cual, implica la existencia de cuerpos intrusivos en profundidad, los cuales pueden aportar esta componente de cohesión en el sistema.

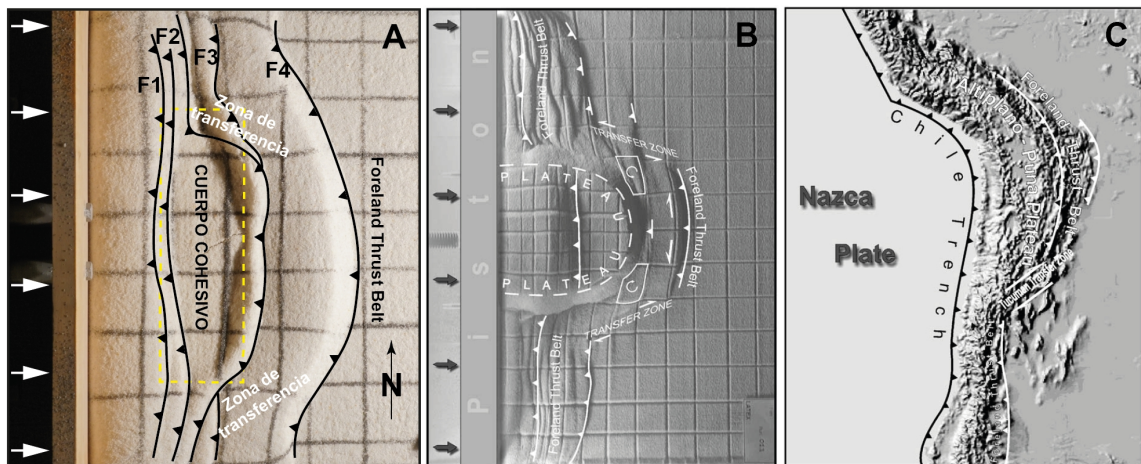


Fig. 29: A) Modelo TAB_PAR_ALT ejecutado en este estudio. B) y C) Comparación entre os modelos de Marques y Cobbold (2002) y el Altiplano de los Andes Centrales (Modificado de Marques y Cobbold, 2002). Se observan similitudes entre cada configuración estructural, la presencia de cadenas montañosas arqueadas tanto antes y delante del objeto en cuestión y la existencia de zonas de transferencias en los límites extremos.

Otro ejemplo comparable con los modelos corresponde a la Faja Plegada y corrida del Aconcagua. Se encuentra en la provincia de Mendoza en el W de Argentina y cuenta con la cima más elevada de América, que es precisamente el cerro Aconcagua. Este último está conformado por lavas,

brechas y cuerpos subvolcánicos andesíticos y dacíticos correspondientes al Complejo Volcánico Aconcagua. Estas rocas solo son cortadas en su parte oriental por la Falla Penitentes que es responsable del alzamiento del Aconcagua y la deformación al S de éste es epidérmica (Ramos, 1985b). Esta deformación al sur integra una serie de fallas (eg. Las Leñas, Quebrada Blanca, La Yesera y De Navarro, entre otras) concentradas en esta área y que ninguna corta las rocas del Complejo Volcánico Aconcagua, pero si las rocas en su entorno correspondientes a las Formaciones: Tordillo, Diamante, Agrio y Auquilco, todas sedimentarias y la última conformado por niveles de yeso. Esta tendencia de la mayoría de las fallas de evitar cortar las rocas del Complejo Volcánico Aconcagua y concentrarse al S de estas, corresponde a una característica que se repite en la mayoría de los modelos de este estudio. En este sentido, las rocas del Complejo Volcánico Aconcagua representarían el cuerpo de mayor cohesión y de comportamiento cuasi-rígido, contrastado con los niveles sedimentarios que representan al paquete granular fallado. Esto también podría ser el resultado de una componente topográfica, en relación a los modelos de Marques y Cobbold (2002), por lo cual se recomienda un análisis local y detallado de los factores que controlan este aspecto estructural. Estos estudios locales, deben además considerar la edad relativa de las estructuras y del cuerpo en cuestión, dado que no se descarta que fallas antiguas (previas al cuerpo cohesivo) sean cubiertas por el material ígneo, o correspondan a las estructuras por las que se vio facilitado su ascenso (Fig. 30).

En la última comparación con ejemplos naturales se discutirá en torno a dos intrusivos pertenecientes a la Superunidad Rio Chicharra y ubicados en las Hojas Quillota y Portillo elaboradas por Rivano *et al.*, (1993). El primero se encuentra en la esquina superior derecha de la hoja, al W de los Hitos Paso las Lletas y Paso de Ortiz, y al N de cerro Alto. Corresponde a un pórfido dacítico de la Unidad Tambillos. Este es cortado solamente por una falla de rumbo aproximado NW y está limitado al W y E por las Formaciones Salamanca y

Pelambres, respectivamente, ambas volcánicas continentales. Estas últimas están fuertemente deformadas por series de fallas ubicadas justo en los bordes W y E del intrusivo pero sin cortarlo; la cual es una de las características que se repite en las experiencias realizadas, sobre todo en las de cohesión alta. En el caso del intrusivo de la Unidad Tambilos, correspondería a un cuerpo más cohesivo que el entorno y entonces la tendencia de las estructuras es esquivarlo y localizarse en sus bordes, sin afectarlo internamente.

Finalmente, el segundo intrusivo sometido a comparación se ubica en el sector central E de la hoja al W del Hito Paso del Rubio y al SE del cerro Yeguas Heladas. Está compuesto de monzonitas y dioritas de la Unidad Río Cerro Blanco y rodeado de las rocas de la Formación Farellones al W y como de la Formación Pelambre al E, ambas volcánicas continentales. En el borde oriental del intrusivo existe una falla que toma la geometría de este, cortando las rocas de la Formación Farellones y poniéndolas en contacto con las de Pelambres. Esta falla no logra cortar al intrusivo, pero si se ubica en su borde homologando su geometría, lo cual es una de las características principales de los resultados de la modelación en este estudio. Según lo anterior, el cuerpo cohesivo se comporta cuasi-rígido, impidiendo ser deformado por la falla, la cual se ubica en su borde y adopta su geometría (Fig. 30).

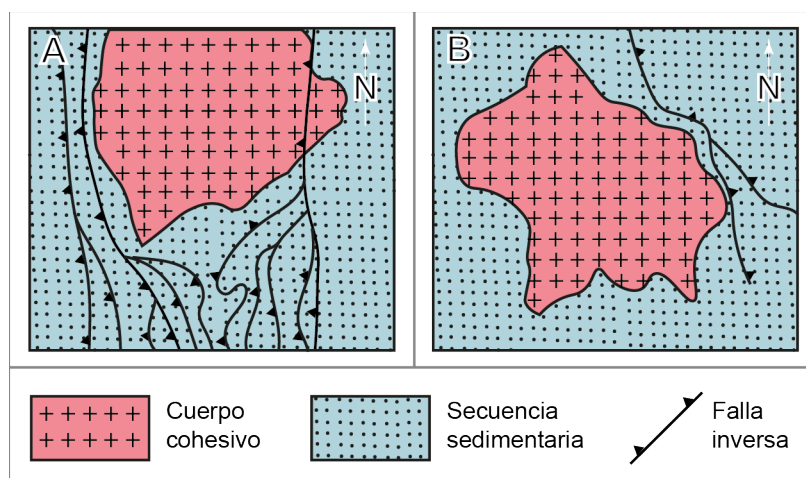


Fig. 30: Diagrama esquemático de aspectos observados en casos naturales. A) Vista en planta donde se muestra que las estructuras evitan al cuerpo cohesivo, y la gran mayoría de estas

aparecen al S del cuerpo. B) Vista en planta del caso en que las estructuras adoptan la geometría del borde del cuerpo cohesivo como su rumbo.

7. CONCLUSIONES

La metodología utilizada, a través de la comparación de las experiencias, permitió aislar de manera efectiva los factores de interés en función de entender el fenómeno estudiado. Los resultados obtenidos son una contribución al entendimiento de sistemas naturales que incluyen un contraste de competencias respecto a un cuerpo y su entorno en el contexto de un sistema compresivo. Se debe tener en cuenta que los modelos analógicos corresponden a una representación simplificada de la naturaleza, y por lo tanto, es importante conocer las limitaciones asociadas a la metodología, con la finalidad de la correcta interpretación de los resultados.

Cabe mencionar que los modelos consideran un sistema de coordenadas geográficas, donde la compresión progresa de W a E. En base a los resultados de los modelos realizados se puede concluir lo siguiente:

(1) La presencia de un cuerpo cohesivo discordante genera el alzamiento de dos cuñas de acreción desplazadas una de otra. Estas evolucionan según lo predicho por la teoría de Cuña Crítica.

(2) La resistencia ejercida por el cuerpo cohesivo genera la migración de la deformación hacia el lado oriental del cuerpo, el cual se comporta como un *backstop* “natural”, al transferir hacia adelante la zona activa de acortamiento. Según esto, el cuerpo cohesivo surge como una adecuada aproximación a la representación de cuñas naturales.

(3) Las fallas tienden a evitar al cuerpo cohesivo y a adoptar como su rumbo la geometría de sus bordes.

(4) La configuración estructural resultante es altamente susceptible a los contrastes de competencia entre los componentes que integran el sistema.

(5) Las alturas de la cuñas tienen una relación inversa respecto de la cohesión del cuerpo, la cual es siempre mayor que el entorno. Con baja cohesión, la cuña próxima al empuje es mucho mayor que la que aparece al oriente del cuerpo, y lo contrario ocurre cuando la cohesión es alta. En estos

últimos también se evidencia la inclinación del cuerpo a medida que se desplaza a lo largo de un nivel de despegue.

(6) Los bordes abruptos en el cuerpo cohesivo, tales como vértices, permiten la formación de zonas de transferencia y generan mayor amplitud de la deformación, a diferencia de los bordes suaves donde las fallas tienden a adaptarse a la geometría en menor distancia, y por ende, el espaciamiento entre estas es menor.

(7) La disposición oblicua del cuerpo favorece que las fallas corten al cuerpo cohesivo y la generación de retrocorrimientos entre las dos cuñas de acreción.

(8) Los patrones generados en las experiencias se encuentran a diferentes escalas espaciales al ser comparados con casos naturales de cuerpos más cohesivos que el entorno. Algunas características similares de los modelos con los prototipos son la tendencia de las fallas de evitar el cuerpo cohesivo y a adoptar en su rumbo la geometría del borde de dicho cuerpo. Se sugiere considerar la presencia de cuerpos más resistentes que su entorno (intrusivos o basamentos cristalinos, entre otros) para explicar curvaturas en patrones estructurales naturales (como fajas plegadas y corridas u orógenos).

Finalmente, se recomienda la elaboración de estudios locales en función de comprender la influencia del contraste de competencias, respecto a un cuerpo cohesivo y su entorno, sobre la configuración estructural de un marco geológico en particular.

8. REFERENCIAS

- Acocella, V., Tibaldi, A. (2005). Dike propagation driven by volcano collapse: a general model tested at Stromboli, Italy. *Geophysical Research Letters* 32, L08308. doi:10.1029/2004GL022248.
- Allmendinger, R.W., Jordan, T.E., Kay, S.M., Isacks, B.L. (1997). The evolution of the Altiplano–Puna plateau of the Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 25, 139–174.
- Anderson, E. M. (1905). The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3): 387–402.
- Autin, J., Bellahsen, N., Husson, L., Beslier, M.O., Leroy, S., d'Acremont, E. (2010). Analog models of oblique rifting in a cold lithosphere. *Tectonics* 29(6), TC6016, <http://dx.doi.org/10.1029/2010tc002671>.
- Barrangou, L.M., Daubert, C.R., Foegeding, E.A. (2006). Textural properties of agarose gels. I. Rheological and fracture properties. *Food Hydrocolloids* 20: 184–195.
- Bonnet, C., Malavieille, J., Mosar, J. (2007). Interactions between tectonics, erosion, and sedimentation during the recent evolution of the Alpine orogen: analogue modeling insights. *Tectonics* 26, TC6016, <http://dx.doi.org/10.1029/2006tc002048>.
- Bons, P.D., Elburg, M.A., Dougherty-Page, J. (2001). Analogue modeling of segregation and ascent of magma. In: Rawling, T., Ailleres, L. (Eds.), *Animations in Geology. Journal of the Virtual Explorer*, vol. 4: 5–10.
- Bot, A., van Amerongen, I.A., Groot, R.D., Hoekstra, N.L., Agterof, W.G.M. (1996a). Large deformation rheology of gelatin gels. *Polymer Gels and Network* 4: 189–227.
- Bot, A., Groot, R.D., Agterof, W.G.M. (1996b). Non-linear elasticity and rupture of gelatin gels. In: Philipps, G.O., Williams, P.A., Wedlock, D.J. (Eds.), *Gums and Stabilizers for the Food Industry* 8. IRL Press, Oxford: 117–126.
- Boudreau, B.P., Algar, C., Johnson, B.D., Croudace, I., Reed, A., Furukawa, Y., Dorgan, K.M., Jumars, P.A., Grader, A.S., Gardiner, B.S. (2005). Bubble growth and rise in soft sediments. *Geology* 33: 517–520.
- Brune, J.N., Ellis, M.A. (1997). Structural features in a brittle-ductile wax model of continental extension. *Nature* 387: 67–70.
- Buchanan, P.G., McClay, K.R. (1991). Sandbox experiments of inverted listric and planar fault systems. *Tectonophysics* 188: 97–115. DOI: 10.1016/0040-1951(91)90317-L.
- Buchanan, P.G., McClay, K.R. (1992). Experiments on basin inversion above reactivated domino faults. *Marine and Petroleum Geology*, 9: 486–500. DOI: 10.1016/0264-8172(92)90061-I.
- Bureau, D., Mourgues, R., Cartwright, J. (2014). Use of a new artificial cohesive material for physical modelling: Application to sandstone intrusions and associated fracture networks. *J. Struct. Geol.* 66: 223–236.

- Byrne, T., Hibbard, J. (1987). Landward vergence in accretionary prisms: The role of backstop and thermal history. *Geology*, 15: 1163–1167.
- Byrne, D.E., Davis, D.M., Lynn, R.S. (1988). Loci and maximum size of thrust Earthquakes and the mechanics of the shallow region of subduction zones. *Tectonics*, 7: 833–857.
- Cadell, H.M. (1889). Experimental researches in mountain building. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1: 339–343.
- Cadell, H.M. (1890). Experimental researches in mountain building. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 35: 1–337.
- Calignano, E., Sokoutis, D., Willingshofer, E., Gueydan, F., Cloetingh, S. (2015). Asymmetric vs: symmetric deep lithospheric architecture of intra-plate continental orogens. *Earth Planet. Sci. Lett.* 424: 38–50,
- Chapple, W.M. (1978). Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts. *Geological Society of America Bulletin*, 89: 1189–1198.
- Cobbold, P.R., Jackson, M.P.A. (1992). Gum rosin (colophony): a suitable material for thermo mechanical modelling of the lithosphere. *Tectonophysics* 210: 255–271.
- Cobbold, P.R., Castro, L. (1999). Fluid pressure and effective stress in sandbox models. *Tectonophysics* 301: 1–19
- Cobbold, P.R., Durand, S., Mourgues, R. (2001). Sandbox modelling of thrust wedges with fluid-assisted detachments. *Tectonophysics* 334(3–4): 245–258.
- Colletta, B., Letouzey, J., Pinedo, R., Ballard, J.F., Balé, P. (1991). Computerized X-raytomography analysis of sandbox models: examples of thin-skinned thrust systems. *Geology* 19: 1063–1067.
- Conejeros, N., Bustos, F. (2016). Diseño y construcción de una mesa geológica análoga de deformación. *Memoria Ingeniería civil mecánica, USACH*.
- Corti, G., Manetti, P. (2006). Asymmetric rifts due to asymmetric Mohos: an experimental approach. *Earth Planet. Sci. Lett.* 245: 315–329.
- Corti, G., (2008). Control of rift obliquity on the evolution and segmentation of the main Ethiopian rift. *Nat. Geosci.* 1: 258–262.
- Coulomb, C.A. (1773). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de Mathématiques et de Physique, Académie Royale des Sciences* 7: 343–382.
- Coutand, I., Cobbold, P.R., de Urreiztieta, M., Gautier, P., Chauvin, A., Gapais, D., Rossello, E.A., López-Gamundí, O. (2001). Style and history of Andean deformation, Puna plateau, northwestern Argentina. *Tectonics* 20, 210–234.
- Dahlen, F. (1990). Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Annual Reviews in Earth and Planetary Sciences* 18: 55–99.
- Daubrée, G.A. (1878). Expériences tendant à imiter des formes diverses de ploiements, con- tournements et ruptures que présente l'écorce terrestre. *Comptes Rendus Hebdoma- daires des Séances de l'Académie des Sciences* 86 (12): 733–739 864–869 and 928–931.

- Daubrée, G.A. (1879). Etudes synthétiques de géologie expérimentale. Dunod pt. 1: 828 pp., Paris.
- Davis, D., Suppe, J. y Dahlen, F.A. (1983). Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88(B2): 1153-172.
- Davy, P., Cobbold, P.R. (1988). Indentation tectonics in nature and experiment 1. Experiments scaled for gravity. *Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala* 14: 129-141.
- Davy, P., Cobbold, P.R. (1991). Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. *Tectonophysics* 188: 1-25.
- DeCelles, P.G., Mitra, G. (1995). History of the Sevier orogenic wedge in terms of critical taper models, northeast Utah and southwest Wyoming, *Geological Society of America Bulletin*, 107: 454-462.
- De Urreiztieta, M., Gapais, D., Le Corre, C., Cobbold, P.R., Rossello, E.A. (1996). Cenozoic dextral transpression and basin development at the southern edge of the Puna plateau, NW Argentina. *Tectonophysics* 254, 17-39.
- Di Giuseppe, E., Funiciello F., Corbi F., Ranalli G., Mojoli G. (2009). Gelatins as rock analogs: A systematic study of their rheological and physical properties, *Tectonophysics*, 473(3): 391-403.
- Dixon, J.M., Summers, J.M. (1985). Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes: equipment, model construction techniques and rheology of model materials. *J. Struct. Geol.* 7(1): 83-102.
- Dixon, J.M., Tirrul, R. (1991). Centrifuge modelling of fold-thrust structures in a tripartite stratigraphic succession. *J. Struct. Geol.* 13(1):3-20.
- Dooley, T.P., Schreurs, G. (2012). Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results. *Tectonophysics* 574-575: 1-71.
- Eisenstadt, G., Sims, D. (2005). Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter? *J. Struct. Geol.* 27: 1399-1412.
- Elliott, D. (1976). The motion of thrust sheets. *Journal of Geophysical Research*, 81: 949. DOI: 10.1029/JB081i005p00949
- Ellis, P. G., McClay, K. R. (1988). Listric extensional fault systems- results of analogue model experiments. *Basin Research*, 1(1): 55-70.
- Escher, B.G., Kuenen, P.H. (1929). Experiments in connection with salt domes. *Leidsche Geologische Mededeelingen* 3: 151-182.
- Faugere, E.T., Brun, J.P. (1984). Modélisation expérimentale de la distention continentale *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences Série 2, Mécanique-physique, chimie. sciences de l'univers, sciences de la terre* 299: 365-370.
- Favre, A. (1878). Expériences sur les effets des refoulements ou écrasements latéraux en géologie. *Archives des sciences physiques et naturelles*, n°246.
- Fiske, R.F., Jackson, E.D. (1972). Orientation and growth of Hawaiian volcanic

- rifts: the effect of regional structure and gravitational stresses. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 329: 299–326.
- Forchheimer, P. (1883). *Über sanddruck und Bewegungserscheinungen im inneren trockenen sandes*. Tübingen, Aachen. 53 pp.
- Galland, O., Cobbold, P.R., Hallot, E., de Bremond d'Ars, J., Delavaud, G. (2006). Use of vegetable oil and silica powder for scale modelling of magmatic intrusion in a deforming brittle crust. *Earth and Planetary Science Letters* 243 (3–4): 786–804.
- Gartrell, A.P. (1997). Evolution of rift basins and low-angle detachments in multilayer analog models. *Geology* 25: 615–618.
- Gestain, V., Nalpas, T., Rouby, D., Barrier, L. (2004). Rôle des niveaux incompétents syn-cinématiques sur l'évolution des zones chevauchantes—modélisations analogiques. *Bulletin de la Société Géologique de France* 175 (4): 351–359.
- Gomes, C.J.S. (2006). Positive inversion of extensional footwalls in the southern Serra do Espinhaço, Brazil – insights from sandbox laboratory experiments. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(2): 331–344.
- Gomes, C.J.S. (2013). Investigating new materials in the context of analog-physical models. *J. Struct. Geol.* 46: 158–166.
- Graveleau, F., Hurtrez, J.E., Dominguez, S., Malavieille, J. (2011). A new experimental material for modeling relief dynamics and interactions between tectonics and surface processes. *Tectonophysics* 513: 68–87.
- Graveleau, F., Malavieille, J., Dominguez, S. (2012). Experimental modelling of orogenic wedges: a review. *Tectonophysics* 538–540: 1–66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.027>.
- Gressier, J. B., Mourgues, R., Bodet, L., Matthieu, J. Y., Galland, O., & Cobbold, P. (2010). Control of pore fluid pressure on depth of emplacement of magmatic sills: An experimental approach. *Tectonophysics*, 489(1): 1–13.
- Hall, J. (1805). III. Experiments on Whinstone and Lava. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 5(1): 43–75.
- Hall, J. (1815). On the vertical position and convolutions of certain strata and their relationship with granite. *Trans. R. Soc. Edinburgh*, 7: 79–10.
- Hampel, A., Adam, J., Kukowski, N. (2004). Response of the tectonically erosive south Peruvian forearc to subduction of the Nazca Ridge: analysis of three-dimensional analogue experiments. *Tectonics* 23, TC5003, <http://dx.doi.org/10.1029/2003tc001585>.
- Horsfield, W. (1977). An experimental approach to basement-controlled faulting. *Geol. Mijnbouw* 56: 363–370.
- Hoth, S., Hoffmann-Rothe, A., Kukowski, N., (2007). Frontal accretion: an internal clock for bivergent wedge deformation and surface uplift. *J. Geophys. Res.* 112.
- Hubbert, M. K. (1937). Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 48(10):

1459-1520.

- Hubbert, M. K. (1951). Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 62(4): 355-372.
- Huigi, L., McClay, K.R., Powell, D. (1992). Physical models of thrust wedges. In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, London: 71–81.
- Hyndman, D.W., Alt, D. (1987). Radial dikes, laccoliths, and gelatin models. *Journal of Geology* 95: 763–774.
- Ito, G., Martel, S.J. (2002). Focusing of magma in the upper mantle through dike interaction. *Journal of Geophysical Research* 107. doi:10.1029/2001JB000251.
- Jacoby, W.R. (1973). Model experiment of plate movements. *Nature Phys. Sci.* 242: 130–134.
- Jacoby, W.R. (1976). Paraffin model experiment of plate tectonics. *Tectonophysics* 35: 103–113.
- Jara, P., Likerman, J., Winocur, D., Ghiglione, M. C., Cristallini, E. O., Pinto, L., & Charrier, R. (2015). Role of basin width variation in tectonic inversion: insight from analogue modelling and implications for the tectonic inversion of the Abanico Basin, 32–34 S, Central Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1): 83–107.
- Johnson, A.M. Pollard, D.P. (1973). Mechanics of growth of some laccolithic intrusions in the Henry Mountains, Utah. I. Field observations, Gilbert's model, physical properties and flow of magma. *Tectonophysics* 18: 261–309.
- Karig, D.E. (1974). Evolution of arc systems in the Western Pacific. *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 2: 51–75.
- Kavanagh, G.M. Ross-Murphy, S.B., (1998). Rheological characterization of polymer gels. *Progress of Polymer Sciences* 23: 533–562.
- Kavanagh, J.L., Menand, T., Sparks, R.S. (2006). An experimental investigation of sill formation and propagation in layered elastic media. *Earth and Planetary Science Letters* 245: 799–813.
- Kincaid, C., Olson, P. (1987). An experimental study of subduction and slab migration. *J. Geophys. Res.* 92 (13): 13832–13840.
- Konstantinovskaia, E., Malavieille, J. (2005). Erosion and exhumation in accretionary orogens: experimental and geological approaches. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6.
- Konstantinovskaya, E., Malavieille, J. (2011). Thrust wedges with décollement levels and syntectonic erosion: a view from analogue models. *Tectonophysics* 502 (3–4): 336–350.
- Konstantinovskaya, E.A., Rodriguez, D., Kirkwood, D., Harris, L.B., Thériault, R. (2009). Effects of basement structure, sedimentation and erosion on thrust wedge geometry: an example from the Quebec Appalachians and analogue models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 57 (1): 34–62.
- Koyaguchi, T., Takada, A. (1994). An experimental study on the formation of

- composite intrusions from zoned magma chambers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59: 261–267.
- Koyi, H.A., Vendeville, B.C. (2003). The effect of décollement dip on geometry and kinematics of model accretionary wedges. *J. Struct. Geol.* 25: 1445–1450.
- Koyi, H.A., Sans, M., Teixell, A., Cotton, J., Zeyen, H. (2004). The significance of penetrative strain in the restoration of shortened layers—insights from sand models and the Spanish Pyrenees. In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems: American Association of Petroleum Geologists Memoir*: 207–222.
- Krantz, R.W. (1991). Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures. *Tectonophysics* 188: 203–207.
- Kukowski, N., Lallemand, S.E., Malavieille, J., Gutscher, M.-A., Reston, T.J. (2002). Mechanical decoupling and basal duplex formation observed in sandbox experiments with application to the western Mediterranean Ridge accretionary complex. *Marine Geology* 186 (1–2): 29–42.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Testing Techniques and Results. Clausthal, Germany.
- Lamb, S., Hoke, L. (1997). Origin of the high plateau in the Central Andes, Bolivia, South America. *Tectonics* 16, 623–649.
- Leever, K.A., Gabrielsen, R.H., Faleide, J.I., Braathen, A. (2011a). A transpressional origin for the West Spitsbergen fold-and-thrust belt: insight from analog modeling. *Tectonics* 30, TC2014. doi:10.1029/2010TC002753.
- Leturmy, P., Mugnier, J.L., Vinour, P., Baby, P., Colletta, B., Chabron, E. (2000). Piggyback basin development above a thin-skinned thrust belt with two detachment levels as a function of interactions between tectonic and superficial mass transfer: the case of the Subandean Zone (Bolivia). *Tectonophysics* 320: 45–67.
- Link, T.A. (1930). Experiments relating to salt-dome structures. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 14: 483–508.
- Lister, J.R., Kerr, R.C. (1991). Fluid-mechanical models of crack-propagation and their application to magma transport in dykes. *Journal of Geophysical Research* 96: 10049–10077.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J., Oncken, O. (2003). The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. *J. Struct. Geol.* 25: 1691–1711.
- Luth, S., Willingshofer, E., Sokoutis, D., Cloetingh, S. (2013a). Does subduction polarity changes below the Alps? Inferences from analogue modelling. *Tectonophysics* 582: 140–161.
- Malavieille, J. (2010). Impact of erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: analog models and case studies. *GSA Today* 20: 4–10.
- Mandl, G., de Jong, L.N.J., Maltha, A. (1977). Shear zones in granular materials.

- RockMech. 9: 95–144.
- Marques, F. O., Cobbold, P. R. (2002). Topography as a major factor in the development of arcuate thrust belts: insights from sandbox experiments. *Tectonophysics*, 348(4), 247–268.
- McClay, K.R. (1990). Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies. *Mar. Petrol. Geol.* 7: 206–233.
- McClay, K.R., y Buchanan, P.G. (1992). Thrust faults in inverted extensional basins. En K.R. McClay (Ed.): *Thrust tectonics*. London, Chapman and Hall: 93–114.
- McGuire, W.J., Pullen, A.D. (1989). Location and orientation of eruptive fissures and feeder-dykes at Mount Etna: influence of gravitational and regional tectonic stress regimes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 38: 325–344.
- McLeod, P., Tait, S. (1999). The growth of dykes from magma chambers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 92: 231–245.
- Menand, T., Tait, S.R. (2002). The propagation of a buoyant liquid-filled fissure from a source under constant pressure: an experimental approach. *Journal of Geophysical Research* 107. doi:10.1029/2001JB000589.
- Mitra, S. (1993). Geometry and kinematic evolution of inversion structures. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 77: 1159–1191.
- Mitra, S., Islam, Q. (1994). Experimental (clay) models of inversion structures. *Tectonophysics*, 230: 211–222. DOI: 10.1016/0040-1951(94)90136–8.
- Mitra, G. (1997). Evolution of salients in a fold-and-thrust belt: the effects of sedimentary basin geometry, strain distribution and critical taper. En S. Sengupta (Ed.): *Evolution of geological structures in micro to macro scales*. London, Chapman and Hall: 59–90.
- Moore, J.C. and Karig, D.E. (1976). Sedimentology, structural geology, and tectonics of the Shikoku subduction zone, SW Japan. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87: 1259–1268.
- Mourgues, R., Bureau, D., Bodet, L., Gay, A., Gressier, J. B. (2012). Formation of conical fractures in sedimentary basins: Experiments involving pore fluids and implications for sandstone intrusion mechanisms. *Earth and Planetary Science Letters*, 313: 67–78.
- Mulugueta, G., Koyi, H. (1987). Three-dimensional geometry and kinematics of experimental piggyback thrusting. *Geology* 15: 1052–1056.
- Mulugeta, G., Koyi, H. (1992). Episodic accretion and partitioning in a model sand wedge. *Tectonophysics* 202: 319–333.
- Niemeyer, H. (2008). *Geología Estructural*. RIL Editores. Chile: 22–26.
- Norziah, M.H., Foo, S.L., Karim, A.A. (2006). Rheological studies on mixtures of agar (*Gracilaria changii*) and κ-carr. eenan. *Food Hydrocolloids* 20.
- Panien, M., Schreurs, G., Pfiffner, A.O. (2006). Mechanical behaviour of granular materials, used in analogue modelling: insights from grain characterisation, ring-shear tests and analogue experiments. *J. Struct. Geol.* (9): 1710–1724.
- Parker, T.J., y McDowell, A.N. (1955). Model studies of salt-dome tectonics.

- Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 39: 2384–2470.
- Pasquare, F.A., Tibaldi, A. (2003). Do transcurrent faults guide volcano growth? The case of NW Bicol Volcanic Arc, Luzon, Philippines. *Terra Nova* 15: 204–212.
- Payrola P.A. (2012). Andean oblique folds in the Cordillera Oriental e Northwestern Argentina: Insights from analogue models. *Journal of Structural Geology* 42: 194–211.
- Pollard, D.D., Johnson, A.M. (1973). Mechanics of growth of some laccolithic intrusions in the Henry Mountains, Utah, II. Bending and failure of overburden layers and sill formation. *Tectonophysics* 18: 311–354.
- Ratschbacher, L., Merle, O., Davy, P., Cobbold, P. (1991). Lateral extrusion in the Eastern Alps; Part 1, Boundary conditions and experiments scaled for gravity. *Tectonics* 10: 245–256.
- Ramberg, H. (1967). Model experimentation of the effect of gravity on tectonic processes. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 14: 307–329.
- Ramberg, H. (1981). Gravity. In: *Deformation and the Earth's Crust*, second ed. Academic Press, London.
- Ramos, V.A., 1985 b. El Mesozoico de la Alta Cordillera de Mendoza: reconstrucción tectónica de sus faicies. Argentina. IV° Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Actas I(2): 104–118.
- Ribe, N.M., Davaille, A. (2013). Dynamical similarity and density (non-) proportionality in experimental tectonics. *Tectonophysics* 608: 1371–1379.
- Richard, P. (1991). Experiments on faulting in a two-layered cover sequence overlying a reactivated basement fault with oblique-slip. *J. Struct. Geol.* 13: 459–469.
- Rivalta, E., Böttinger, M., Dahm, T. (2005). Buoyancy-driven fracture ascent: experiments in layered gelatine. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 144: 273–285.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., Espiñeira, D. (1993). Hojas Quillota y Portillo, V Región. Servicio Nacional de Geomlogía y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 73.
- Roperch, P., Fornari, M., He´rail, G., Parraguez, G.V. (2000). Tectonic rotations within the Bolivian Altiplano: implications for the geodynamic evolution of the central Andes during the late Tertiary. *Journal of Geophysical Research* 105, 795–820.
- Rossi, D., Storti, F. (2003). New artificial granular materials for analogue laboratory experiments: aluminium and siliceous microspheres. *J. Struct. Geol.* 25: 1893–1899.
- Schardt, H. (1884). Geological Studies in the Pays-D'Enhant Vaudois, *Bull. de le Soc. Vaudois des Sci. Nat.* xx: 143–146.
- Schellart, W. P. (2000). Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics* 324: 1–16.

- Schellart, W.P., Lister, G.S., Jessell, M.W. (2002a). Analogue modelling of asymmetrical back-arc extension. *J. Virtual Explorer* 7: 25–42.
- Schellart, W.P., Lister, G.S., Jessell, M.W. (2002b). Analogue modeling of arc and backarc deformation in the New Hebrides arc and North Fiji Basin. *Geology* 30: 311–314.
- Schellart, W.P., Jessell, M.W., Lister, G.S. (2003). Asymmetric deformation in the backarc region of the Kuril arc, northwest Pacific: new insights from analogue modeling. *Tectonics* 22 (5), 1047, <http://dx.doi.org/10.1029/2002tc001473>.
- Schellart, W. P., Strak, V. (2016). A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*: 7–32.
- Shemenda, A.I. (1983). Similarity Criteria in Mechanical Modeling of Tectonic Processes Soviet. *Geol. Geophys.* 24: 8–16.
- Shemenda, A.I., Grocholsky, A.L. (1994). Physical modeling of slow seafloor spreading. *J. Geophys. Res.* 99: 9137–9153.
- Sherlock, D.H., Evans, B.J. (2001). The development of seismic reflection sandbox modeling. *AAPG Bull.* 85: 1645–1659.
- Silver, E.A., Ellis, M.J., Breen, N.E., Shipley, T.H. (1985). Comments on the growth of accretionary wedges. *Geology*, 13: 6–9.
- Sokoutis, D., Burg, J.P., Bonini, M., Corti, G., Cloetingh, S. (2005). Lithospheric-scale structures from the perspective of analogue continental collision. *Tectonophysics* 406: 1–15.
- Suppe, J. (1981). Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China* 4: 67–89.
- Takada, A. (1990). Experimental study on propagation of liquid-filled crack in gelatin: shape and velocity in hydrostatic condition. *Journal of Geophysical Research* 95: 8471–8481.
- Takada, A. (1994). Development of a subvolcanic structure by the interaction of liquid-filled cracks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 61: 207–224.
- Tapponnier, R., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R., Cobbold, P. (1982). Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from simple experiments with plasticine. *Geology* 10: 611–616.
- Teixell, A., Koyi, H.A. (2003). Experimental and field study of the effects of lithological contrasts on thrust-related deformation. *Tectonics* 22 (5), 1054. doi:10.1029/2002TC001407.
- Twiss, R.J., Moores, E.M. (2007). *Structural Geology*. Freeman and Co.: 736 pp. New York.
- Villaruel, S. (2016). Influencia de la inyección de fluidos en cuencas invertidas: una aproximación por medio de modelación analógica. Memoria Departamento de Geología, U. de Chile.
- Walter, T.R., Troll, V.R. (2003). Experiments on rift zone evolution in unstable volcanic edifices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*

127: 107–120.

- Watanabe, T., Koyaguchi, T., Seno, T. (1999). Tectonic stress control on ascent and emplacement of magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91: 65–78.
- Watanabe, T., Masuyama, T., Nagaoka, K., Tahara, T. (2002). Analog experiments on magma-filled cracks: competition between external stresses and internal pressure. *Earth Planets Space* 54: 1247–1261.
- Weijermars, R., Schmeling, H. (1986). Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity). *Phys. Earth Planet. Interiors* 43: 316–330.
- Willis, B. (1893). The mechanics of Appalachian structure. *United States Geological Survey Annual Report* 13 (Part 2): 211–281.
- Whitehead, J.A., Luther, D.S. (1975). Dynamics of laboratory diapir and plume models. *J. Geophys. Res.* 80: 705–717.
- Yagupsky, D.L., Cristallini, E.O., Fantín, J., Zamora Valcarce, G., Bottesi, G., Varadé, R. (2008). Oblique half-graben inversion of the Mesozoic Neuquén Rift in the Malargüe Fold and Thrust Belt, Mendoza, Argentina: New insights from analogue models. *J. Struct. Geol.* 30: 839–853.
- Yamada, Y., McClay, K.R. (2003a). Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. 1: 2D hanging wall deformation and section restoration. *J. Struct. Geol.* 25: 1551–1560.
- Yamada, Y., McClay, K.R. (2003b). Application of geometric models to inverted historic fault systems in sandbox experiments. 2: insights for possible along strike migration of material during 3D hanging wall deformation. *J. Struct. Geol.* 25: 1331–1336.
- Yamada, Y., McClay, K.R. (2004). 3-D Analog modeling of inversion thrust structures. En K.R. McClay (Ed.): *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 82: 276–301.

ANEXOS

ANEXO 1: FUNCIONAMIENTO SERVO MOTOR Y SERVO DRIVER

Los modelos realizados en este trabajo contaron con la utilización de una combinación de servo driver “Lexium 23 Plus” y servo motor “BCH”, cuyas referencias son LXM23pU07M3X y BCH0802Op2p1C, respectivamente. Corresponde a un sistema de baja inercia y sus características técnicas se muestran en la Tabla A1.

Tabla A1: Especificaciones técnicas de la combinación servo driver y servo motor de baja inercia.

Potencia de salida servo motor BHC	Inercia servo motor BHC (sin freno)	Par torsor nominal	Máximo par torsor	Máxima velocidad	Velocidad nominal
kW	Kgcm	Nm	Nm	rpm	rpm
0,75	1,13	2,39	7,16	5000	3000

El sistema se controla a través del software “Lexium 23 CT” por medio del modo control de velocidad donde se fijan las revoluciones de avance (contra la manecillas del reloj) y retroceso del pistón, con un signo positivo y negativo, según se le ordene al programa. Para entrar en dicho modo se debe abrir la ventana de “*Parameter Initial Wizard*” y elegir la opción “[0x02] S Mode” (Fig. A1 y A2). Cabe mencionar que al cambiar el modo de control se debe reiniciar el driver. Esta opción permite configurar diferentes parámetros dentro del modo de control, como la elección de las entradas digitales (DI) en las cuales se deben definir los parámetros 0x14 y 0x15 en DI3 y DI4, respectivamente, los cuales permiten controlar la velocidad del motor (Fig. A1).



Fig. A1: Selección del “Parameter Initial Wizard” (izquierda), definición de parámetros de velocidad en entradas digitales DI3 y DI4 (derecha).

En la opción “Internal Speed/Torque” se lleva acabo la definición de velocidades de acuerdo a las entradas digitales (DI) configuradas para el modo de velocidad entre los parámetros P1-09 y P1-11 del sistema. Las velocidades de avance y retroceso son registradas en las opciones “Internal Register1” e “Internal Register2”, ambos valores en rpm (Fig. A2). Así mismo, es posible configurar el valor de torque en el sistema, el cual por defecto es 100%, equivalente al par torsor nominal 2,39 Nm (Tabla A1). Este valor de torque es suficiente para mover el pistón, puesto que el par torsor requerido en la mesa de modelación es de 1,9 Nm (Conejeros y Bustos, 2016), lo cual se encuentra por debajo del que trae por defecto el motor.

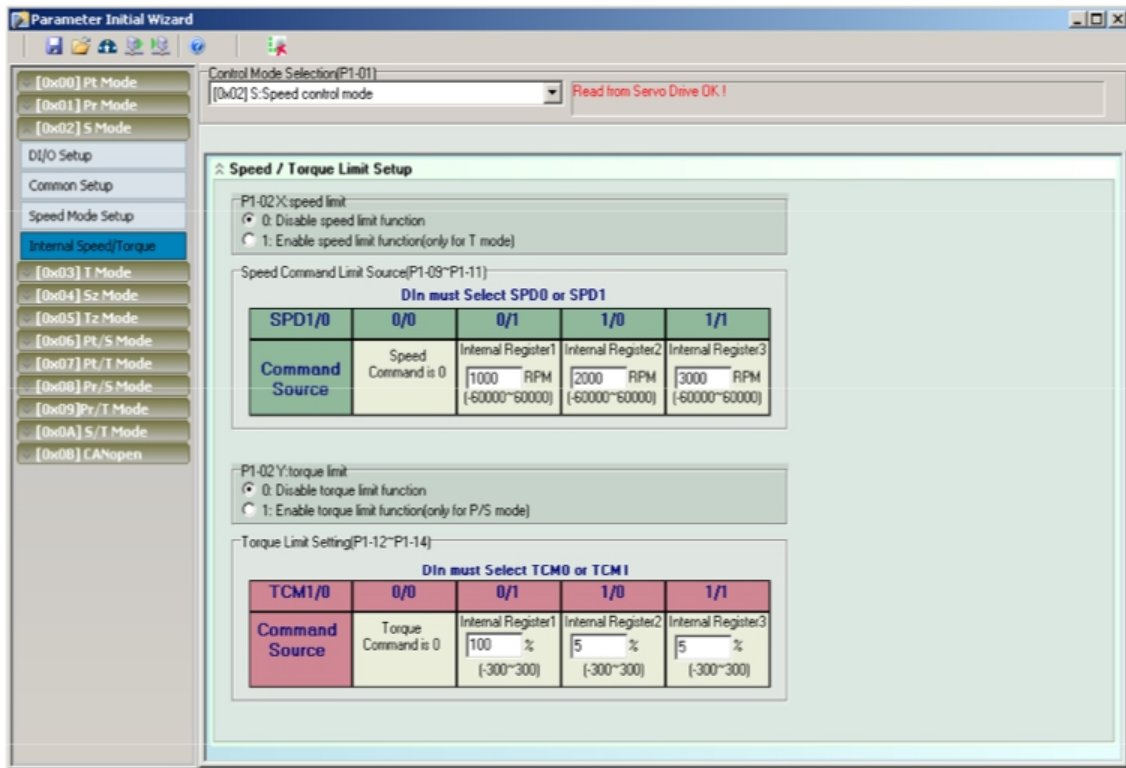


Fig. A2: Selección de modo de control y opción “Internal Speed/Torque”.

Una vez fijados los valores de velocidad deseados se debe abrir la ventana de comando “*Digital IO/Jog Control*”, donde se pueden visualizar las entradas y salidas digitales seleccionadas para el modo de control (Fig. A3). Finalmente, se activa el parámetro “Servo On” para encender el motor, y lo mismo con el parámetro de velocidad requerido según avance o retroceso en entradas DI3 o DI4, lo cual va a permitir el movimiento del motor en la velocidad y dirección configurada previamente.

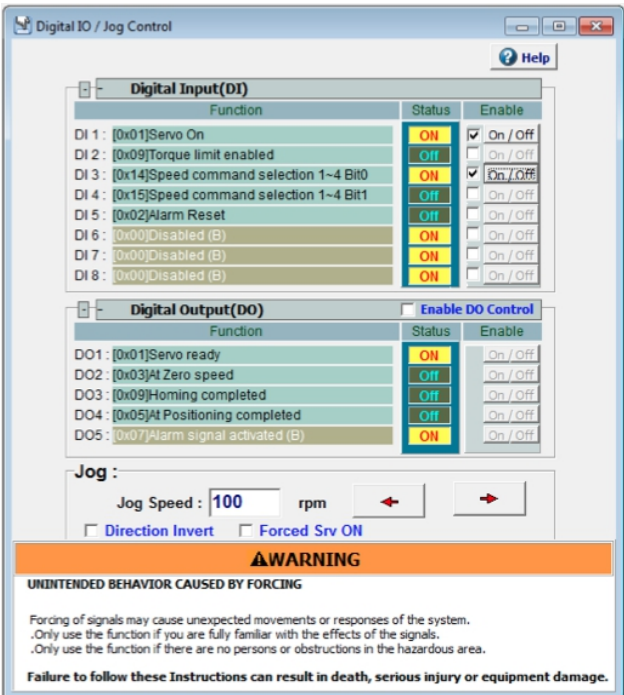


Fig. A3: Ventana de operación “*Digital IO/Jog Control*” con parámetros “Servo On” y “Speed command selection 1~4 Bit0” seleccionados y listos para ser activados para controlar el movimiento del eje del servo motor según requerimientos.

ANEXO 2: REGISTRO DE ENSAYOS DE LABORATORIO

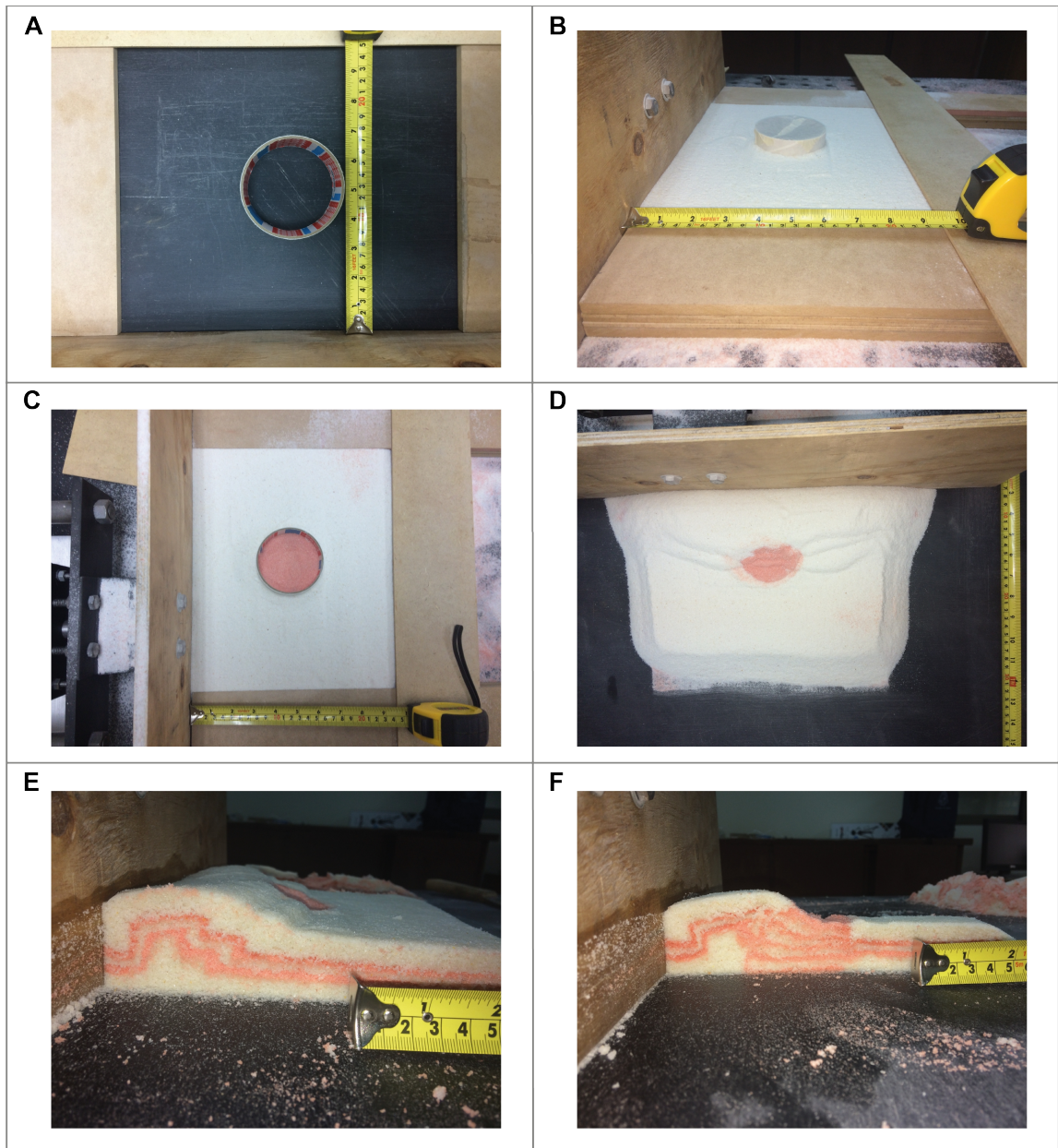


Fig. A4: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M3 (detalles y observaciones en ANEXO 3).

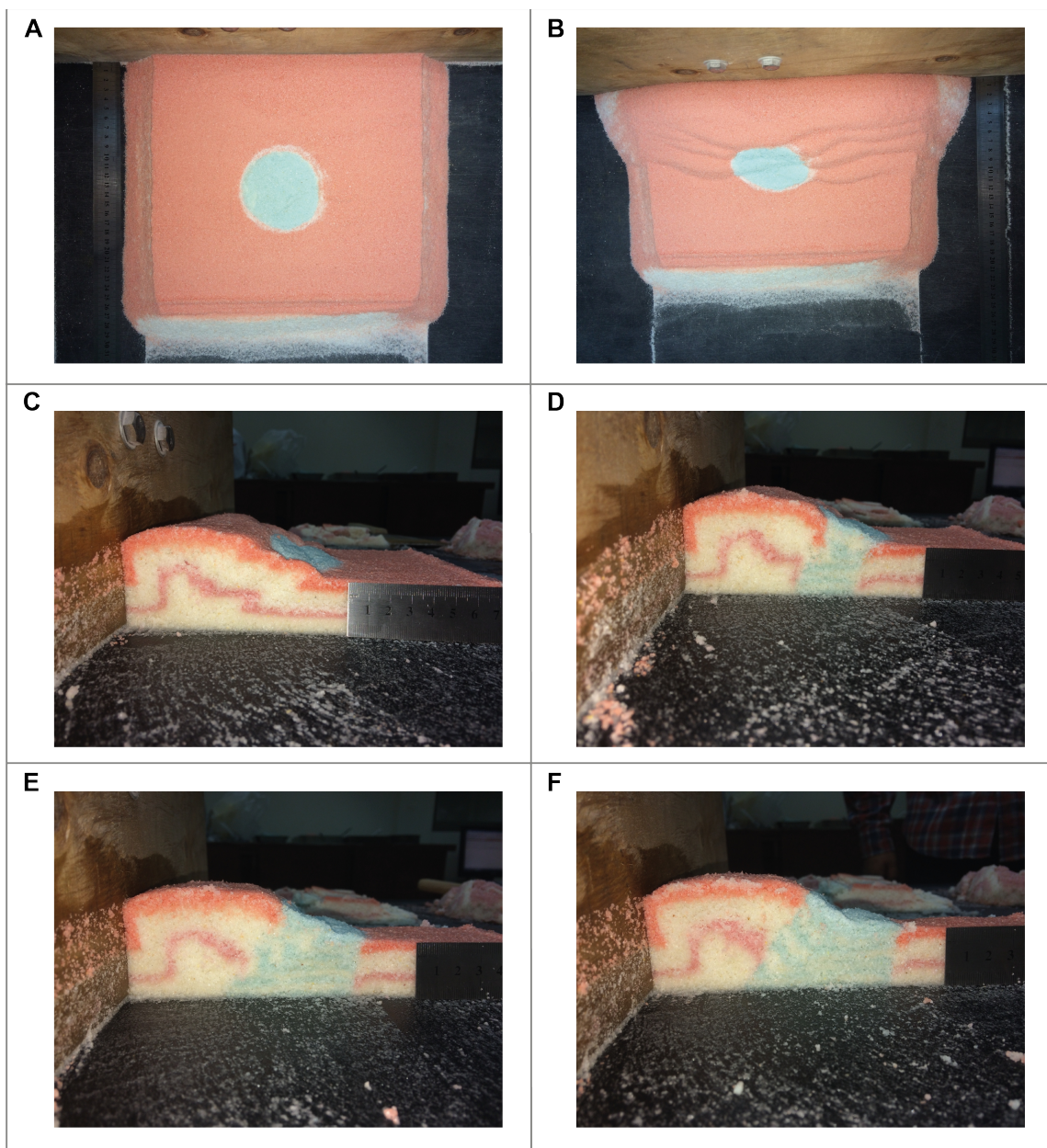


Fig. A5: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M4 (detalles y observaciones en ANEXO 3).

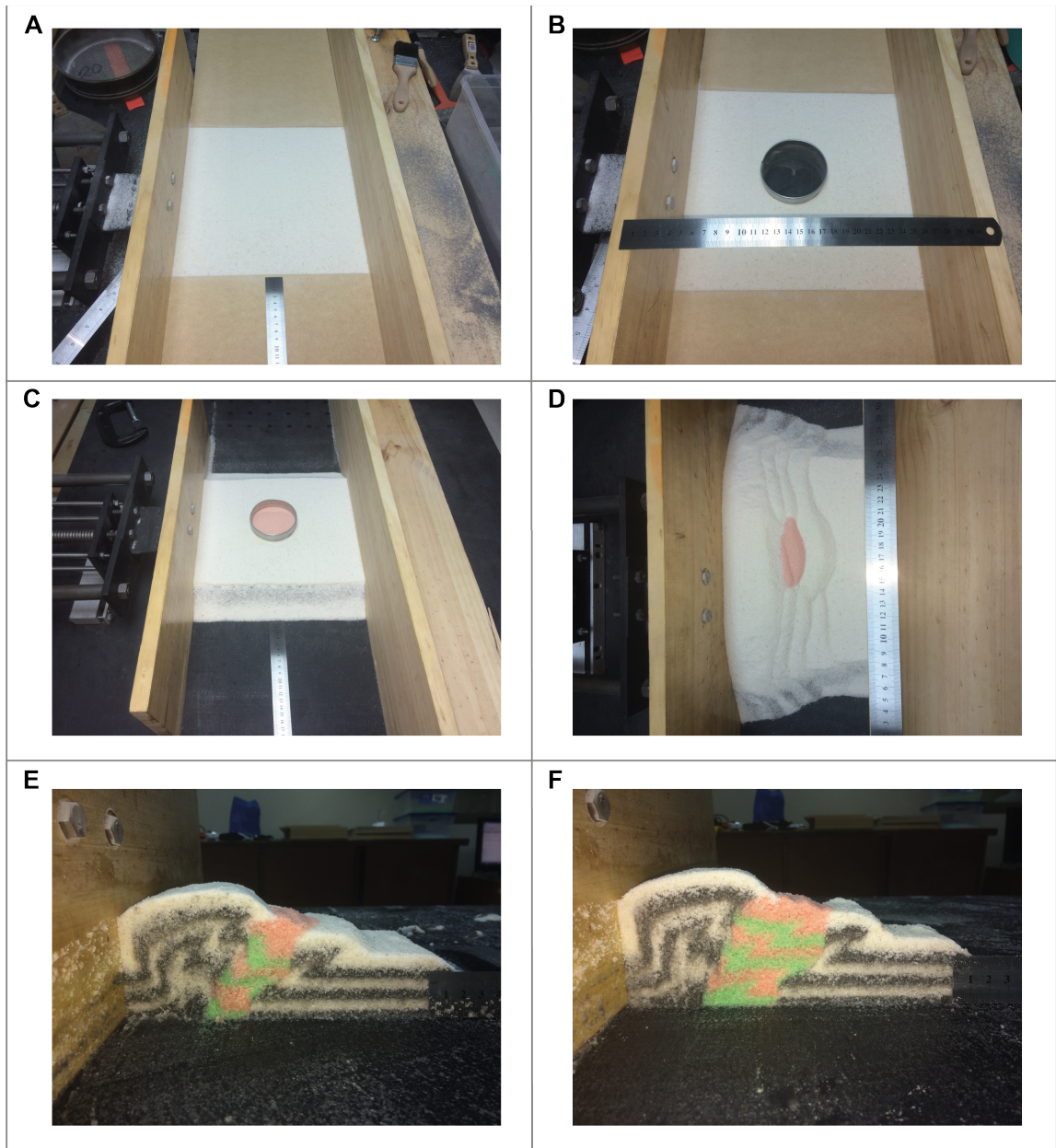


Fig. A6: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M5 (detalles y observaciones en ANEXO 3).

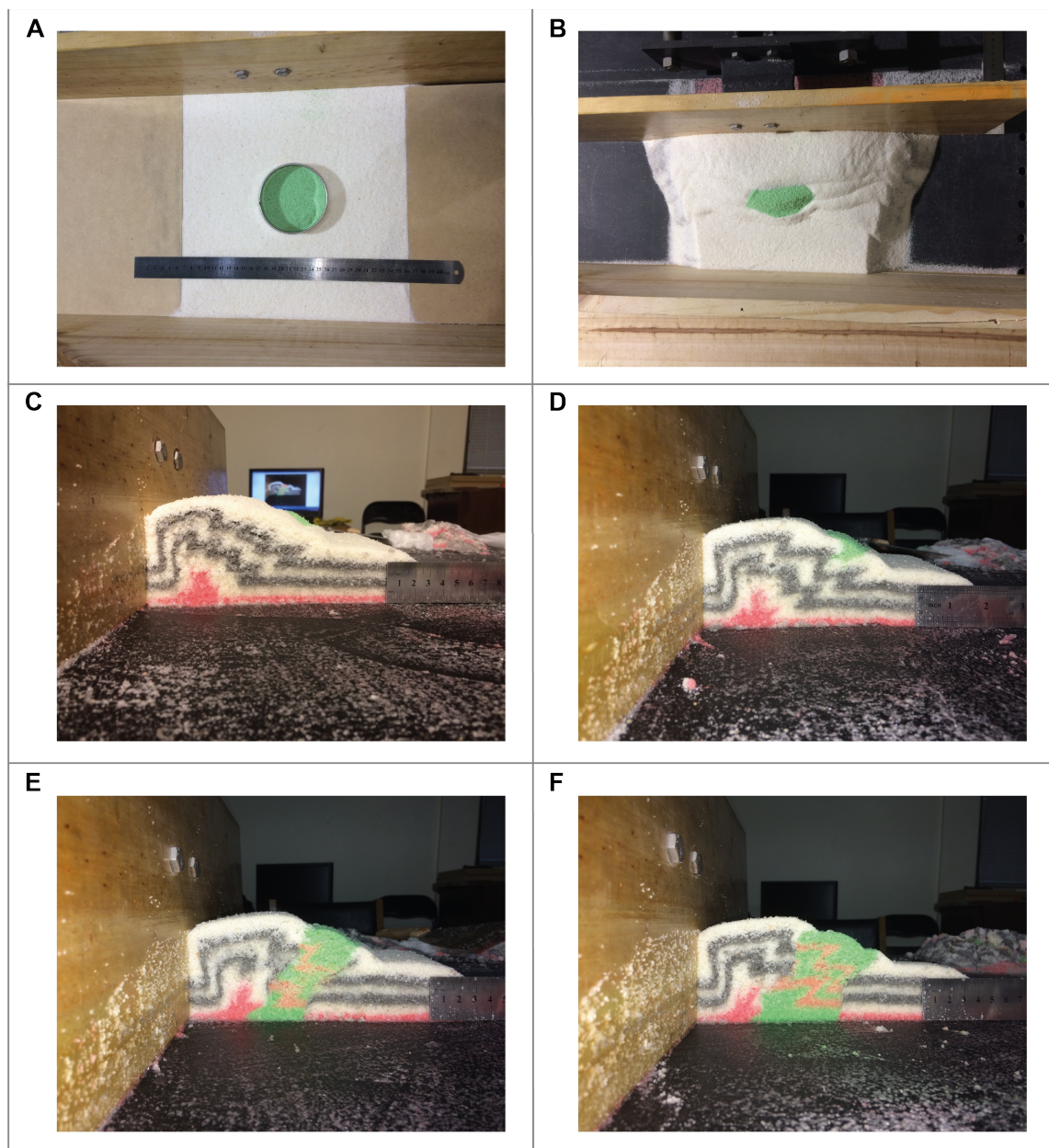


Fig. A7: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M7 (detalles y observaciones en ANEXO 3).

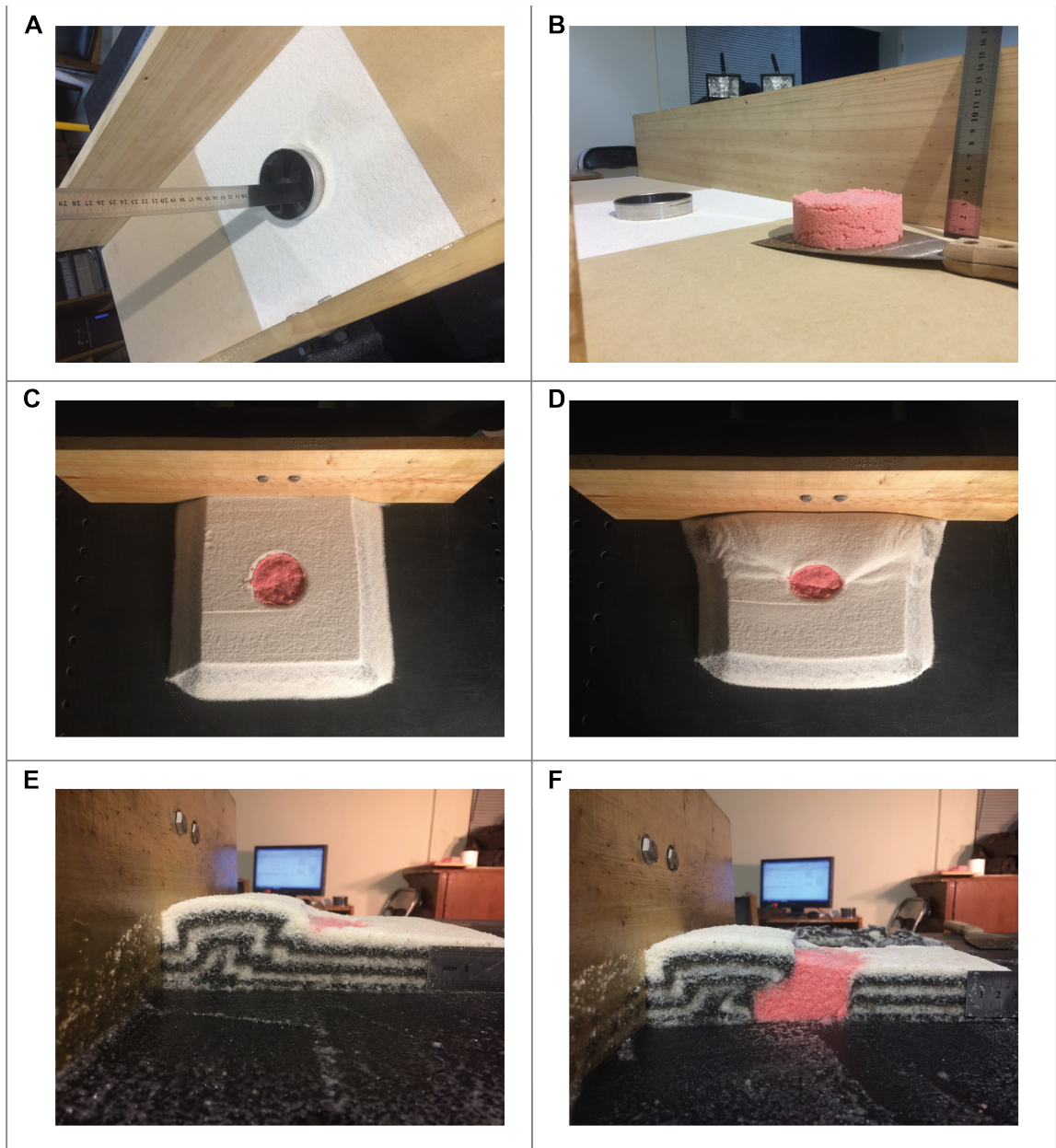


Fig. A8: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M8 (detalles y observaciones en ANEXO 3).

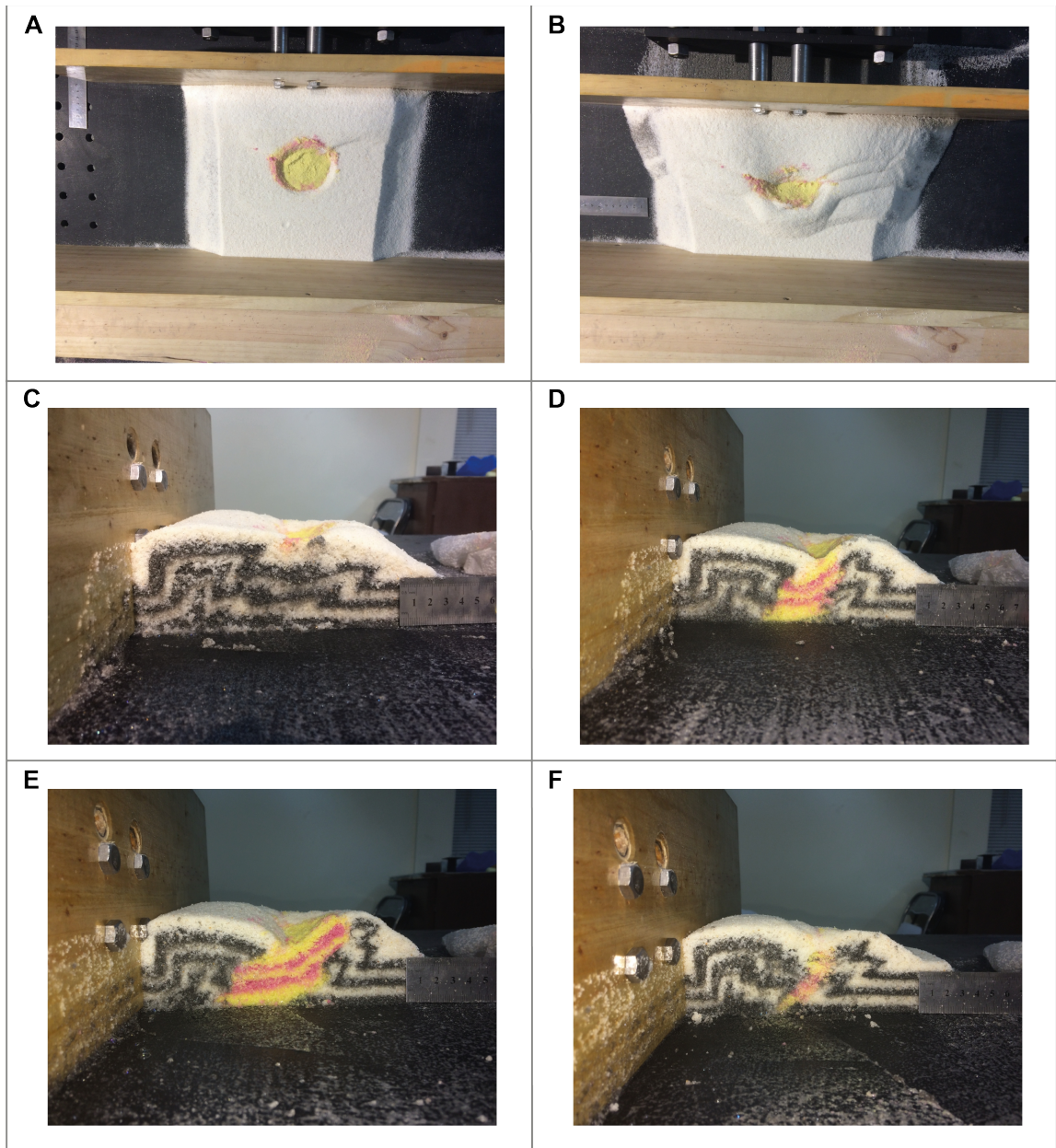


Fig. A9: Registro fotográfico en planta y perfil del montaje y resultado del ensayo M9 (detalles y observaciones en ANEXO 3).

ANEXO 3: ENSAYOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Tabla A2: Tabla con las características y observaciones de los ensayos y pruebas de laboratorio que dieron paso a la elaboración del montaje experimental definitivo.

Código ensayo	Dimensiones (cm)	N° Capas (espesor en mm)	Material	Cuerpo cohesivo				Acortamiento (cm)	Espesor final (cm)	Particularidades	Observaciones
				Geometría	Dimensiones	Capas (mm)	Disposición (cm)				
M1	25 X 30 X 2,4	3 (9, 3 y 3)	Arena	Cilíndrica	5 cm diámetro	3	Centro (9 - 9)	6	5	Inserción de cuerpo del mismo material pero con estratificación de colores diferentes al paquete granular.	El cuerpo y las tres capas estratificadas son muy pequeñas para observar la deformación en su interior. Las dimensiones del modelos también resultan muy pequeñas para lograr un acortamiento adecuado.
M2	28 X 30 X 2,4	4 (9, 3, 9 y 3)	Arena	Sin inserción de cuerpo cohesivo				14	5	Considera tabla antes del muro móvil con el objetivo de facilitar la construcción del paquete granular.	Al sacar la tabla se remueve el material y se deforma parcialmente el sector contiguo al muro del modelo. La dimensión es suficiente para permitir el acortamiento y generar la cuña de acreción
M3 (Fig. A4)	25 X 30 X 2,7	5 (9, 3, 3, 3 y 9)	Arena	Cilíndrica	7,6 cm diámetro	9 (~3 c/u)	Centro (12,5 - 15)	6	4	Incluye cuerpo estratificado en el centro del modelo	Este espesor y dimensiones permiten solo 6 cm de acortamiento. Se confunde la

										para poder observar deformación en su interior.	deformación al interior del cuerpo debido a la similitud de colores entre las estratificaciones.
M4 (Fig. A5)	25 X 30 X 2,4	4 (9, 3, 9 y 3)	Arena	Cilíndrica	7,6 cm diámetro	9 (~3 c/u)	Centro (12,5 - 15)	7 a 8	5,5	Incluye cuerpo estratificado celeste con blanco inserto en paquete estratificado rojo con blanco.	La similitud de los colores no permite identificar con claridad las estructuras generadas. Se requiere estratificar el cuerpo con dos colores contrastantes a los de la estratificación del paquete.
M5 (Fig. A6)	30 X 30 X 3,3	6 (5,5 c/u)	Arena	Cilíndrica	~8,7 cm diámetro	6 (~5,5 c/U)	Centro (15 - 15)	10	7,5	Considera: muro trasero, cuerpo estratificado depositado por medio de tamizado e insertado después de la cobertura succionando el material y muro móvil barnizado contra el agua.	El muro trasero fijo permite acortar la longitud deseada. El contraste de colores entre el cuerpo y el paquete permite identificar de buena manera la deformación en el interior y el exterior del cuerpo. Se genera un pop up y la cuña crítica con la falla más joven cortando el cuerpo desplazándolo hacia el pie de la cuña.
M6	30 X 30 X 3,3	6 (5,5 c/u)	Arena	Cilíndrica	~8,7 cm diámetro	3 (~5,5 c/U)	Centro (15 - 15)	10	7,5	El cuerpo de distinto color, no aflora, se encuentra	La capa negra queda en superficie, y esta no permite la percolación del agua,

										cubierto por 3 capas de material. Tiene 1,7 cm de espesor.	por tanto al momento de rebanar el modelo, este no se endureció y no fue posible registrar en perfil el estado final de la experiencia.
M7 (Fig. A7)	30 X 30 X 3,3	6 (5,5 c/u)	Arena y arena gelatinizada	Cilíndrica	~8,7 cm diámetro	5 (~5 c/U)	Centro (15 - 15)	10	7,3	El cuerpo inserto está compuesto de arena gelatinizada en proporción de 1 g/l. Esta se dejó secar para ser cernida al momento de generar la estratificación del cuerpo.	La arena gelatinizada pierde cierta cohesión entre sus granos, al ser tamizada para depositarse al interior del cuerpo. Por lo tanto, no se refleja el efecto cohesionante de la gelatina. De todas maneras la deformación del modelo (falla más joven) no logra traspasar el cuerpo hacia el pie de la cuña
M8 (Fig. A8)	30 X 30 X 3,3	6 (5,5 c/u)	Arena y arena gelatinizada	Cilíndrica	~8,7 cm diámetro	1 (3,3)	Centro (15 - 15)	9	6	El cuerpo inserto (sin estratificación), fue preparado antes de insertarlo en el molde, mezclado con proporción de 3 g/l de gelatina. Se secó manteniendo	El cuerpo mantiene sus granos cohesionados, dado su preparación. Se producen 2 fallas en la cuña, la más joven logra desplazar el cuerpo, pero no se generan fallas en la región alejada del muro móvil. Como el cuerpo no fue estratificado, no se logra ver la deformación interna,

										la forma del molde y posteriormente fue insertado en el paquete granular.	solo se distingue la deformación en sus bordes.
M9 (Fig. A9)	30 X 30 X 3,3	6 (5,5 c/u)	Arena y arena gelatinizada	Cilíndrica	~8,7 cm diámetro	6 (~5,5 c/U)	Centro (15 - 15)	10	6	El cuerpo fue preparado con anterioridad a su inserción con 1,5 g/l. Además fue estratificado con arena coloreada amarilla y morada, ambas mezcladas con misma proporción de gelatina. Se dejó secar con la forma del molde y posteriormente se insertó dentro del paquete granular.	La proporción de gelatina logra cohesiones el material, pues agarra la forma del molde, pero no permite una manipulación fácil, por tanto se tuvo que generar gran cantidad de cuerpos pues se derrumbaban al tomarlos con suavidad. La poca cohesión adquirida dificulta su inserción dentro del paquete granular, puesto que es muy frágil y tiende a romperse al más mínimo titubeo. Se logró insertar uno, pero las perturbaciones de la manipulación pueden haber modificado sus características. Se recomiera trabajar con mezclas de mayor cohesión.

